Public Safety and Emergency Preparedness Canada
Critical Infrastructure Protection and Emergency Preparedness

Sécurité publique et Protection civile Canada
Protection des infrastructures essentielles et Protection civile

GLISSEMENTS DE TERRAIN CATASTROPHIQUES ET PROCESSUS CONNEXES DANS LE SUD-EST DE LA CORDILLÈRE :

ANALYSE DES EFFETS SUR LES CONDITIONS DE VIE ET LES LOCALITÉS

Remerciements

La présente publication a été préparée pour le :

Sécurité publique et
Protection civile Canada

2e étage, Édifice Jackson
122, rue Bank
Ottawa (Ontario) K1A 0W6
Tél. : (613) 944-4875
Sans frais : 1-800-830-3118
Téléc. : (613) 998-9589
Courriel : communications@ocipep-bpiepc.gc.ca
Internet : www.ocipep-bpiepc.gc.ca

Auteurs :

Dr Stephen G. Evans – Chercheur scientifique et spécialiste en glissement de terrain
Dr Réjean Couture – Chercheur scientifique et ingénieur en géologie
Eliane L. Raymond, M.Sc. – Spécialiste des sciences physiques et géomorphologue

Commission géologique du Canada – Ressources naturelles Canada

Ce document s'inspire d'un travail financé par la Direction de la recherche et du développement (DRD) du Bureau de la protection des infrastructures essentielles et de la protection civile (BPIEPC), en vertu du contrat portant le numéro de référence 2001D002. Le BPIEPC fait maintenant partie de Sécurité publique et Protection civile Canada (SPPCC). Les opinions, constations et conclusions ou recommandations exprimées dans le présent document sont celles de l'auteur et ne correspondent pas nécessairement aux points de vue de Sécurité publique et Protection civile Canada.

© SA MAJESTÉ LA REINE DU CHEF DU CANADA (2002)
N° de catalogue : PS48-2/2004F-PDF
ISBN : 0-662-76002-6

Microsoft et Access sont des marques de commerce ou des marques de commerce déposées de Microsoft Corporation.

Tous les autres noms de produits et d'entreprises peuvent être des marques de commerce ou des marques de commerce déposées de leurs entreprises respectives.

Sommaire

Les glissements de terrain sont des catastrophes naturelles importantes au Canada étant donné qu'elles ont des effets sur les communautés, les conditions de vie et l'économie, tant au niveau régional que national. Les glissements de terrain ont causé la mort de plus de 600 personnes dans l'ensemble du Canada depuis le milieu du 19^{e} siècle. De plus, les communautés ont subi des dommages, les lignes de communications ont été rompues et les ressources disponibles ont été perturbées de façon importante. Des études récentes de la répartition géographique des glissements de terrain au Canada ont indiqué que la Cordillère canadienne, composée d'environ un cinquième de la terre émergée du Canada, est la région la plus susceptible aux glissements de terrain catastrophiques.

Le sud-est de la Cordillère (délimité de façon générale par la route transcanadienne au nord, les contreforts à l'est et la vallée de l'Okanagan à l'ouest) a été le site de nombreux glissements de terrain catastrophiques, notamment le glissement de Frank de 1903, le pire glissement de terrain à s'être produit au Canada. La région est traversée par des corridors de transport stratégique national, regorge d'importantes ressources naturelles et de vastes régions sont désignées patrimoine national. Le registre chronologique des glissements de terrain catastrophiques a été compilé à partir de documents historiques des cas existants, de documents d'archive et de renseignements fournis par les sociétés de transport et les organismes canadiens. Le registre a été assemblé en une base de données relationnelle.

Les glissements de terrain catastrophiques importants ont été identifiés de la façon suivante : avalanches de roches, les chutes de pierres, les coulées de débris et les avalanches de débris provoqués par la chute de pluie et les glissements de terrain dans des pentes composées de formations glacio-lacustres. Les pentes à déformation rocheuse constituent cependant un risque difficile à évaluer. À un site stratégique, des modèles d'élévation numériques ont été utiles dans la détermination des changements de la surface.

On a tenté de définir, sur le plan régional, les risques associés au glissement de terrain dans le sud-est de la Cordillère et on a analysé l'importance des facteurs tels que les activités humaines et le climat pour la détermination de la fréquence des glissements de terrain. L'étude offre un cadre de travail pour l'évaluation des risques régionaux et pour l'évaluation des mesures d'atténuation ainsi que des stratégies relatives à la protection civile et à l'intervention en cas de catastrophe causée par un glissement de terrain pour cette région.

Table des matières

Remerciements ii

Sommaire iv

1.0 Introduction 1

1.1 Contexte 1
1.2 Objectifs 2

2.0 Caractéristiques régionales 3

3.0 Types de glissements de terrain catastrophiques et phénomènes connexes 5

4.0 Base de données sur les glissements de terrain catastrophiques 10

4.1 Analyse de la base de données sur les glissements de terrain catastrophiques 16

5.0 Analyse d'histoires de cas de glissements de terrain catastrophiques 17

5.1 Glissements de terrain causés par une rupture d'une pente rocheuse 17
5.1.1 Vague générée par une chute de pierres, lac Arrow supérieur, Colombie-Britannique (82K/12); 28 février 1903 17
5.1.2 Avalanche de roches de Frank, en Alberta (82G/09); 29 avril 1903 19
5.1.3 Chutes de pierres du mont Bastion, en Colombie-Britannique (82L/14) le 22 décembre 1959 et le 23 novembre 1983 22
5.1.4 Chute de pierres le long du lac Kootenay, près de Procter, en Colombie-Britannique (82F/10) le 20 janvier 1995 26
5.1.5 Glissements rocheux dans la vallée de la rivière Beaver et glissement de terrain de la Porte Est, parc national des Glaciers, Colombie-Britannique 27
5.1.6 Glissement rocheux– avalanche de débris de Clanwilliam, Eagle Pass, chaîne Columbia, Colombie-Britannique, mai 1999 31
5.2 Coulées de débris et avalanches de débris 33
5.2.1 Coulée de débris de la crique Little Sheep, près de Rossland, en Colombie-Britannique (82F/04) le 20 avril 1897 33
5.2.2 Coulée de débris de Twin Butte, vallée Illecillewaet, près de Revelstoke (82N/04-82M/01) le 11 mai 1961 33
5.2.3 Coulée de débris de Camp Creek, en Colombie-Britannique (82L/15–16) le 5 juin 1968 34
5.2.4 Coulées de débris au mont Cathedral, vallée Kicking Horse (82N/08) le 6 septembre 1978 et le 29 août 1984 35
5.2.5 Avalanche de débris de la crique Belgo, dans la circonscription Joe Rich, en Colombie-Britannique (82E/14) le 12 juin 1990 38
5.2.6 Coulée de débris du mont Stephen, près de Field, en Colombie-Britannique (82N/08) le 3 août 1994 39
5.2.7 Coulée de débris de la crique Hummingbird, au lac Mara, en Colombie-Britannique ((82L14-15) le 11 juillet 1997 42
5.2.8 Coulées de débris à la crique Five-Mile, près de Banff, dans le parc national Banff, en Alberta, le 4 août 1999 44
5.3 Glissements dans les terrils de charbon 48

5.3.1 Glissement de déchets de la mine de charbon, à Sparwood, en Colombie-Britannique (82G/10) le 24 novembre 1968 48
5.3.2 Glissements gigantesques de déchets de la mine de charbon à la crique Kilmarnock, en Colombie-Britannique (82J/02) le 26 octobre 1989 et le 31 mai 1993 50
5.4 Coulées silteuses et chutes de silt dans du silt glacio-lacustre 51
5.4.1 Chutes de terre à Summerland, dans la vallée de l'Okanagan, en Colombie-Britannique (82E/12) le 27 septembre 1970 et le 15 septembre 1992 51

6.0 Déclencheurs de glissement de terrain et avertissement donné par le changement climatique 54
6.1 Dossiers sur le climat 54
6.2 Température 55
6.3 Précipitation 57
6.4 Analyse d'incidents extrêmes – Précipitation maximale en 24 heures 58

7.0 Élaboration d'un modèle de risques de glissements de terrain régionaux 67
7.1 Danger 67
7.2 Risque total régional 69

8.0 Sommaire 70

9.0 Références 72

1.0 Introduction

1.1 Contexte

Les glissements de terrain sont des catastrophes naturelles importantes au Canada étant donné qu'elles ont des effets sur les localités, les conditions de vie et l'économie tant régionales que nationales (Evans, 2001). Les glissements de terrain ont causé la mort de plus de 600 personnes dans l'ensemble du Canada depuis le milieu du 19^{e} siècle (Evans, 1997, 2001). De plus, les communautés ont subi des dommages, les lignes de communications ont été rompues et les ressources disponibles ont été perturbées de façon significative.

Des études récentes de la répartition géographique de l'effet des glissements de terrain au Canada (Evans, 2001) ont indiqué que la Cordillère canadienne, composée d'environ un cinquième de la terre émergée du Canada, est la région la plus sujette aux glissements de terrain catastrophiques. Des travaux d'envergure ont été entrepris sur les glissements de terrain dans la Cordillère du sud-ouest, tels que revus par Evans et Savigny (1994). Dans la présente étude, nous mettons l'accent sur les glissements de terrain dans le sud-est de la Cordillère.

Le sud-est de la Cordillère se délimite, de façon générale, par la route transcanadienne au nord, les contreforts à l'est et la vallée de l'Okanagan à l'ouest et comprend le sud-est de la Colombie-Britannique et des parties du sud-ouest de l'Alberta. La région est traversée par des corridors de transport stratégique nationaux, regorge d'importantes ressources naturelles et de vastes régions sont désignées patrimoine national.

Les liens vitaux de vie et les localités dans le sud-est de la Cordillère sont vulnérables aux glissements de terrain catastrophiques. En plus d'avoir été le plus important glissement de terrain subi par le Canada, le glissement de Frank de 1903, au cours duquel près de 70 personnes ont trouvé la mort, les infrastructures assurant les liens vitaux ont été récemment sujettes à des glissements de terrain catastrophiques. La présence d'une avalanche de débris provoquée par une chute de pluie à Passmore, dans la vallée de Slocan dans le sud-est de la Colombie-Britannique, en avril 2000, a mis en évidence les risques que posent de tels phénomènes et montre bien l'effet qu'ils ont sur les infrastructures assurant les liens vitaux dans le sud de la Cordillère. Le glissement de Passmore a endommagé les lignes d'énergie électrique et les câbles de téléphoniques privant plus de 4000 résidents de la région du service téléphonique. Le glissement a aussi paralysé l'autoroute 6 de la Colombie-Britannique pendant plusieurs jours, perturbant ainsi les transports dans la région.

D'autres glissements de terrain récents ont eu des incidences sur les liens vitaux de la région (p. ex., la coulée de débris de Banff de 1999 (Couture et Evans, 2000a) qui a coupé des câbles de fibre optique sous-terrains, a perturbé le transport et dans certains cas a provoqué des déraillements coûteux (Evans, 1999). De plus, les glissements de terrain récents ont également eu des effets sur les localités (p. ex., la coulée de débris de Swansea Point de 1999).

Les infrastructures assurant les liens vitaux du sud-est de la Cordillère sont essentielles à l'économie, tant à l'échelle régionale que nationale. Par exemple, les réseaux de transport traversant la région sont des points de transit indispensables pour les principales marchandises canadiennes exportées, tel le blé, le charbon et le carbonate neutre de potassium. Les localités de

104-06747/

la région sont en plein développement. La région a une population croissante, une industrie du tourisme florissante et d'importantes industries de ressources primaires.

1.2 Objectifs

Les objectifs du présent document sont les suivants :

1. Assembler une base de données détaillée des glissements de terrain catastrophiques historiques dans la région à l'étude. La base de données sera en Microsoft® Access et les cartes seront numériques.

2. Élaborer une analyse et une évaluation des risques d'une sélection d'histoires de cas de désastres historiques, notamment des avalanches de roches, des chutes de pierres, de coulées de débris, de glissements de terrain dans des pentes bâties ainsi que des glissements de terrain de matériaux glacio-lacustres.

3. Examiner les répercussions des aspects temporels du registre des catastrophes sur la protection civile, y compris la fréquence de l'occurrence des types de glissement, des déclencheurs types et du changement possible de la fréquence dans le temps.

4. Établir une première approximation dans le cadre d'un modèle régional de risque associé aux glissements de terrain.

2.0 Caractéristiques régionales

Géomorphologie et géologie – La partie sud-est de la Cordillère est formée de plusieurs chaînes de montages distinctes séparées par des vallées profondes orientées de nord en sud. De nombreux lacs allongés de même que deux rivières importantes – la Columbia et la Kootenay – sont alimentées par d'énormes quantités d'eau fraîche provenant de l'accumulation de neige durant l'hiver et transportée par des criques agitées.

Deux des cinq ceintures géomorphologiques constituant la Cordillère canadienne forment la région : les ceintures de Foreland et d'Omineca (Gabrielse et al., 1991; figure 2-1). La ceinture de Foreland forme les chaînes de montage et les contreforts à l'est de la Cordillère canadienne, dans le sud-est de la Colombie-Britannique et le sud-ouest de la Colombie-Britannique. Sa frontière orientale est indiquée par la limite est de la strate des contreforts. Sa frontière occidentale coïncide avec la fosse des montagnes Rocheuses. Dans la ceinture de Foreland, les formations rocheuses contiennent principalement des roches sédimentaires de l'âge précambrien jusqu'au début de l'âge tertiaire, y compris du gneiss de soubassement cristallin et des roches clastiques carbonatées. La ceinture contient une épaisseur minimale d'environ 15 km de roches sédimentaires précambriennes, paléozoïques, mésozoïques et du début du tertiaire.

La ceinture d'Omineca est située entre la ceinture de Foreland et le Plateau intérieur. La ceinture d'Omineca se compose d'une série d'éléments structuraux orientés du nord-ouest et comprend les chaînes de montages élevées et accidentées Purcell, Selkirk, Columbia, Monashee et Cariboo. Elle est dominée par de nombreuses roches métamorphiques et des quantités moindres de roches granitoïdes. Les roches métamorphiques plissées et faillées de manière complexe et représentent les racines visibles d'une chaîne de montagnes qui s'est formée il y a environ entre 180 et 60 millions d'années.

Ressources minérales et énergie – La partie sud-est de la Colombie-Britannique est également reconnue pour ses gisements importants de métaux précieux, tel l'or, l'argent et les métaux du groupe des platineux (Dawson et al., 1991). Dans la zone étudiée, les ressources pétrolières sont principalement confinées à la ceinture de Foreland. De vastes ressources de charbon bitumineux et subbitumineux et de lignite sont aussi présentes dans la ceinture de Foreland et sont exploitées dans de gigantesques mines à ciel ouvert.

Population et peuplement – La zone à l'étude couvre 88 732 km^2. La population est d'environ 475 220, ce qui constitue une densité de population de 5,4 personnes/km^2. L'importance économique de la vallée de Beaver River est depuis longtemps reconnue. La route a tout d'abord été découverte et utilisée par le Canadien Pacifique (CPR) à la fin du 19^e siècle. La route transcanadienne a été construite le long du corridor au début des années 60 et une deuxième ligne du CPR a été achevée à la fin des années 80.

Plus de 1,5 million de véhicules traversent le col Rogers chaque année. Au cours des mois d'été, environ 6000 véhicules par jour circulent par le segment (communication personnelle, parc national des Glaciers). De plus, environ 40 convois ferroviaires circulent chaque jour sur la ligne principale de CP Rail, pour un total de 14 000 convois par année (communication personnelle, CPR).

Figure 2-1 Ceintures géologiques et chaînes de montagnes principales du sud-est de la Cordillère (d'après Gabrielse et al., 1991).

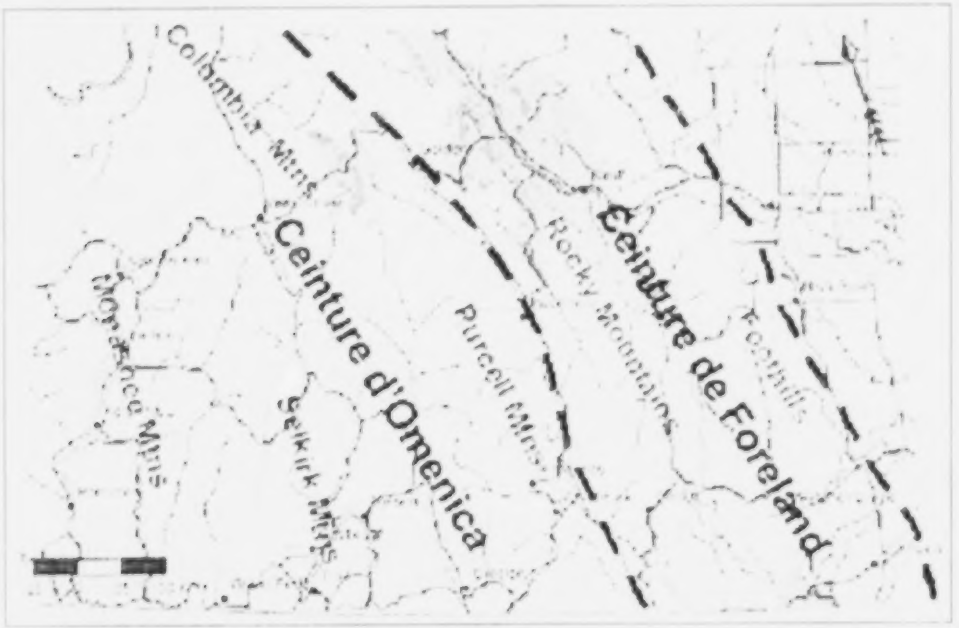
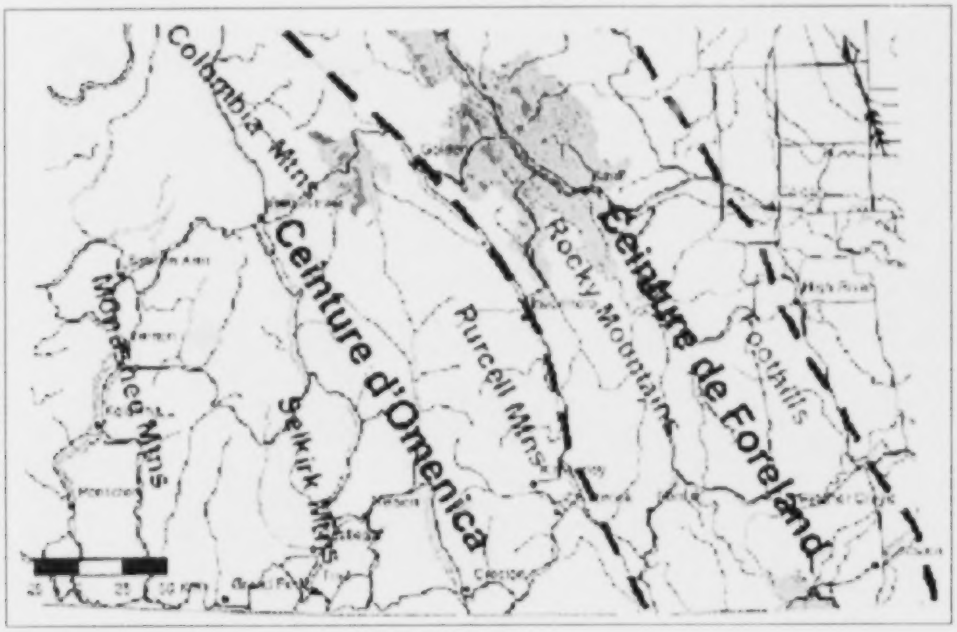


Figure 2-1 Ceintures géologiques et chaînes de montagnes principales du sud-est de la Cordillère (d'après Gabrielse et al., 1991).



3.0 Types de glissements de terrain catastrophiques et phénomènes connexes

Un certain nombre de types de glissements de terrain catastrophiques et de phénomènes connexes sont actifs dans la partie sud-est de la Cordillère. Ils comprennent les suivants :

1. Les *avalanches de roches* concernent la fragilité initiale et la désintégration subséquente d'une grosse masse rocheuse d'une pente de montage et le mouvement rapide descendant de ce débris vers une vallée. Le terme à été utilisé pour la première fois par des géologues de la Commission géologique du Canada pour décrire le glissement de Frank de 1903, dans les contreforts des montagnes Rocheuses de l'Alberta (McConnell et Brock, 1904). Les avalanches de roches dépassent généralement 1 M m^3 en volume et peuvent être très mobiles, c'est-à-dire que les débris peuvent se déplacer sur de longues distances (jusqu'à 10 km dans certains cas de la Cordillère) de leur point de départ. Les avalanches de roches sont le type le plus rapide de glissement de terrain et peuvent atteindre des vitesses très élevées. Par exemple, selon un témoin visuel, l'avalanche de roches de Frank de 1903 a durée environ 100 secondes et a parcouru 3,12 km, donnant une vitesse moyenne de 31,2 m/s (112 km/h). Les avalanches de roches sont très destructrices lorsqu'elles touchent l'activité humaine, comme ce fût le cas pour le glissement de Frank qui a frappé les abords de la ville de Frank, en Alberta, tuant environ 70 personnes. Un grand nombre de dépôts préhistoriques par avalanche de roches existent dans la Cordillère du sud-est, spécialement dans les montagnes Rocheuses (p. ex., l'avalanche de roches du lac Kananaskis). La plus importante avalanche de roches préhistorique connue dans la région est le dépôt de la Valley of the Rocks (volume évalué à 1G m^3) dans les montagnes Rocheuses du sud-est de la Colombie-Britannique (Evans, 2001). Un autre gigantesque dépôt est celui de l'avalanche de roches préhistorique du passage de Three Valley. Il a débuté des pentes est du mont Griffin, a rempli la vallée et a formé le lac Three Valley, un lac de barrage endigué par glissement de terrain.

2. Les *glissements rocheux rapides* font transition aux avalanches de roches. Ils se produisent lorsqu'une masse rocheuse glisse sur une surface de décollement, tel un plan de litage ou une surface de faille, et les débris ne quittent que partiellement la source d'origine. La grande partie des débris n'est déposée qu'à une distance très courte sur la pente descendante. Les *glissements rocheux lents* font transition à la déformation d'une pente de montagne et sont limités en terme de déplacement mais montrent des surfaces de cisaillement bien définies et un escarpement reconnaissable (Mt. Mackenzie).

3. La *déformation d'une pente de montage* est un processus problématique lié au glissement lent et comporte un mouvement de glissement lent profond d'une grosse masse rocheuse qui montre souvent des signes de détachement et de fracturation de la subsurface et donnent des signes de perturbation de la surface de la pente. Le phénomène est appelé « affaissement » et peut indiquer une phase précoce du développement d'un glissement de terrain profond d'un terrain montagneux. Ce type de mouvement de pente peut comporter un mouvement le long des surfaces de cisaillement discret ou d'une reptation de masse profonde. Il se manifeste en présence de caractéristiques topographiques telles

les fentes, les fissures, les fosses, les escarpements à contre-pente[1] au milieu ou dans la partie supérieure des pentes et, dans certains cas, le bombement de la pente dans les parties inférieures des pentes. Ces caractéristiques géomorphiques linéaires sont appelées « sackungen », tirant son origine du mot allemand pour affaissement. Ces caractéristiques se produisent généralement sans escarpements frontaux, escarpements latéraux ou zones de cisaillement bien définis, laissant croire qu'un mouvement de la pente se produit sans la formation de surfaces de cisaillement bien définies (contrairement aux glissements rocheux). Les sackungen sont très répandus dans l'ensemble du sud-est de la Cordillère, particulièrement dans les roches métamorphiques de la chaîne Columbia.

4. La *chute de pierres* comporte une masse rocheuse beaucoup plus petite que les avalanches de roches ou les glissements rocheux rapides. Dans le cas d'une chute de pierres, la masse rocheuse se désagrège en plusieurs blocs qui tombent, rebondissent et roulent sur des pentes escarpées après s'être détachés de la pente rocheuse. Les chutes de pierre sont habituellement inférieures à 50 000 m^3 mais peuvent atteindre des vitesses élevées se situant entre 35 et 40 m/s (126 et 144 km/h). Les chutes de pierres constituent un problème constant sur les voies de transport traversant le sud-est de la Cordillère et ont aussi eu un impact sur les édifices situés au bas de la pente de substratum (p. ex., la chute de pierres de Sunnybrae de 1983). Le niveau d'exposition aux risques de chutes de pierres le long des voies de transport a été réduit par la stabilisation des pentes rocheuses, la protection des pentes rocheuse et la pose de clôtures d'avertissement contre les chutes de pierres. Dans d'autres cas, les risques associés aux chutes de pierres ont été réduits par l'excavation de fossés ou l'érection de clôtures en filet d'acier, travaux qui ont été conçus pour recueillir des rochers roulants ou rebondissants avant qu'ils n'atteignent les édifices plus loin dans la pente descendante.

5. Les *coulées de débris* sont des glissements de terrain courants déclenchés par la pluie (p. ex., Evans et Lister, 1984). Elles sont souvent produites par la canalisation d'une avalanche de débris initiale déclenchée dans les pentes supérieures escarpées d'un bassin hydrologique (p. ex., la coulée de débris de Hummingbird Creek de 1997). Dans d'autres cas, les matières des lit de cours d'eau peuvent être mobilisées lorsque le débit d'un cours d'eau dépasse un seuil critique, comme c'est le cas lors de pluies torrentielles ou après la vidange soudaine d'un lac de barrage glaciaire ou morainique (p. ex., le mont Macoun; Evans, 1987; Clague et Evans, 1994). Elles peuvent aussi être déclenchées par la charge de choc des matières du lit d'un cours d'eau, par des chutes de pierres ou des chutes de glace de glaciers (p. ex., les coulées de débris du mont Stephen).

6. Les *avalanches de débris* sont courantes dans les terrains à forte pente boisées. Les volumes des glissements de terrain sont habituellement de 20 000 à 60 000 m^3. Les couloirs d'avalanche de débris peuvent dépasser 500 m de longueur mais ne touchent qu'une très mince couche (moins de 2 m) de matériaux de surface. Selon les comptes rendus de témoins oculaires, la vitesse des avalanches de débris dépasse souvent 10 m/s (36 km/h). Une analyse de l'avalanche de débris de Belgo Creek de 1990 (volume évalué à 23 000 m^3), faite par Hungr (1997a), indiquait des vitesses locales aussi élevées que

[1] Un escarpement à contre-pente est un escarpement de substratum qui est ascendant et qui est formé par une déformation différentielle de la pente.

20 m/s (72 km/h). Le comportement et l'occurrence des avalanches de débris est à l'opposé des coulées de débris à rigoles qui se répètent habituellement sur le parcours d'un canal et dont la vitesse dépasse rarement 7 à 8 m/s (25 à 28 km/h).

7. Les *glissements de terrain de limon glacio-lacustre de type I* – les glissements lents et les coulées rapides sont aussi des caractéristiques des glissements de sédiments glacio-lacustres déposés dans les lacs glaciaires qui existaient dans la plupart des vallées du sud-est de la Cordillère pendant le Pléistocène. Les séquences glacio-lacustres sont caractérisées par un limon interstratifié et des sédiments d'argile de faible résistance. De plus, ces sédiments sont fréquemment interstratifiés avec de rares bandes de sable dans lesquelles des pressions d'eau interstitielle excédentaires peuvent se développer. Des matériaux sensibles ont parfois été constatés dans les séquences glacio-lacustres. Les géométries de la fragilité vont des simples glissements rotationnels aux mouvements complexes dans lesquels la surface de glissement se compose d'éléments laminaires multiples déterminés par l'attitude de caractéristiques telles les fissures, les laminations et le litage. De nombreux centres urbains de la région sont construits sur des sédiments glacio-lacustres et les glissements de ces matériaux ont perturbé les sites le long des berges du fleuve et les rives du lac. Dans la vallée de l'Okanagan, plusieurs problèmes liés à la stabilité de la pente se sont produits le long des rives du lac Okanagan (p. ex., Evans, 1982).

8. *Les glissements de terrain de limon glacio-lacustre de type II* – Les chutes de limon comportent des chutes de dépôts glacio-lacustres desséchés ou agglomérés qui forment de hautes falaises. Ils tirent habituellement leur origine de glissements de plaques minces qui comprennent une rupture de la base de la plaque. Elles peuvent aussi être le résultat d'une rupture de tête. Les chutes de limon prennent naissance dans les falaises qui se forment dans le limon glacio-lacustre du Pléistocène dans les régions semi-arides du sud-est de la Colombie-Britannique (Evans, 1982). Les blocs que renferme la chute de limon se désintègrent en frappant la pente de débris et peuvent couler d'une manière semblable à une avalanche granuleuse (Hungr et al., 2001). Comme l'indiquent les chutes de terre de 1970 et de 1992 (voir l'historique des faits à la section 5.4), un tel phénomène peut être extrêmement destructif. Les chutes de limon sont très soudains et ne donnent pas d'avertissement.

9. L'*érosion et l'affaissement de la subsurface : le phénomène de cheminée* – Des problèmes géotechniques spéciaux sont rencontrés dans les dépôts de limon glacio-lacustre dans les vallées semi-arides du centre-sud et du sud-est de la Cordillère, notamment dans la vallé sud du Thompson, la vallée sud de l'Okanagan et la vallée supérieure du Columbia. On suppose que les limons ont été déposés rapidement dans les lacs glaciaires proglaciaires pendant la déglaciation à la fin du Pléistocène (Fulton, 1975; Nasmith, 1972; Haughton, 1978). L'érosion souterraine (érosion de la subsurface), l'effondrement du sol (la réduction rapide du volume de matériaux en raison de l'humectation) et l'éboulement du sol (la rupture du toit d'un tunnel ou d'un canal) ont donné lieu à l'apparition généralisée de dolines, de dépressions et de caractéristiques géomorphiques connexes (Miller et Nyland, 1981; Haughton, 1978).

10. *Glissements de terrain dans les pentes construites* – des glissements de terrain importants peuvent être provoqués par la rupture de remblais de routes ou de chemins construits par l'homme, de pentes rocheuses déblayées et de terrils miniers. Ces types de glissement de terrain ont été appelés *ruptures géotechniques*. Même s'ils ne sont pas des glissements de terrain naturels à proprement dit, ils comportent des matériaux naturels remaniés et sont souvent provoqués par des conditions hydrométéorologiques extrêmes (p. ex., forte pluie, fonte rapide de neige accumulée) ou par des secousses sismiques. Certains des plus importants glissements de terrain des dernières années au Canada se sont produits sur les pentes des terrils gigantesques aux mines de charbon à ciel ouvert des montagnes Rocheuses du sud-est de la Colombie-Britannique où dix mines génèrent actuellement de 200 à 250 M m^3 de débris par année. Les débris sont déposés dans des terrils énormes construits par le déversement de camions à benne. Plus de 50 glissements par liquéfaction sur longue distance à vitesse élevée ont été dénombrés depuis 1972; au moins neuf glissements par liquéfaction comprennant des volumes dépassant 1 M m^3 se sont produits entre 1971 et 1993 pour aboutir à la rupture gigantesque de 8 M m^3 de 1993 du terril sud de la mine de Fording dans la vallée de Fording. Les vitesses de pointe de ce type de glissement par liquéfaction peuvent atteindre 40 m/s (144 km/h).La rupture des terrils est surveillée attentivement et il est possible de prédire la rupture complète d'une pente en se fondant sur les positions visualisées de la déformation. Les ruptures de terrils de mine de charbon ont fait neuf morts dans le sud-est de la Colombie-Britannique entre 1968 et 1996. Les glissements de terrain rapides se produisent aussi dans les remblais de route et de chemin de fer, souvent avec des résultats désastreux (p. ex., Evans, 1999). La rupture peut prendre naissance dans le remblai même ou comprendre une rupture de la base des fondations du remblai.

11. *Effets secondaires des glissements de terrain de type I : Vagues générées par un glissement de terrain* – Lorsque des glissements de terrain rapides atteignent des rivières, des lacs ou des réservoirs artificiels, ils peuvent générer des vagues d'eau destructrices, également connues sous le nom de tsunamis provoqués par un glissement de terrain (p. ex., la chute de pierres et les vagues des lacs en Flèche de 1903). Ils peuvent aussi se produire lorsque se produit un glissement de terrain subaquatique dans un lac ou un réservoir.

12. *Effets secondaires des glissements de terrain de type II : Barrages par glissement de terrain* – Les barrages par glissement de terrain se forment lorsque des débris de glissement de terrain obstruent le drainage naturel. La formation de barrages par glissement de terrain provoque des dommages en amont en raison de l'inondation arrière et en aval en raison d'une inondation instantanée qui peut se produire après la rupture soudaine du barrage.

13. *Risques associés aux glaciers* –Ce groupe de risques est lié au comportement des glaciers (progression ou recul) et à l'instabilité du glacier lors du recul. Les risques associés aux glaciers comprennent les inondations dues aux avalanches glaciaires, aux débâcles glaciaires provenant de lacs alimentés par un barrage glaciaire ou de poches d'eau à l'intérieur ou à la surface de la glace ainsi qu'aux débâcles causées par la rupture de lacs de barrage morainiques. Ces risques sont courants dans le sud-est de la Cordillère où les

coulées de débris générées par les inondations causées par des débâcles glaciaires ont été particulièrement problématiques (p. ex., mont Cathedral).

14. Les *avalanches de neige* ne sont mentionnées que pour compléter la gamme de risques liés aux pentes que l'on rencontre dans le sud-est de la Cordillère. De lourdes pertes ont été subies au tout début du développement de la région, particulièrement en ce qui a trait au chemin de fer et aux activités minières (Stethem et Schaerer, 1979, 1980, Schaerer, 1987; Jamieson, 2001). Entre 1885 et 1962, les avalanches de neige sur la voie ferrée dans le parc national des Glaciers ont à elles seules tuées 200 personnes. La construction de la route transcanadienne à travers le col Rogers a nécessité la mise sur pied de l'un des programmes les plus avancés au monde pour la prévision et le contrôle des avalanches de neige et de protection contre celles-ci (Schleiss, 1990). Avec l'augmentation de l'héliski et autres types de ski de l'arrière-pays, un nombre croissant d'accidents récréatifs mortels se sont produits en raison des avalanches de neige (Jamieson et Geldsetzer, 1996). Au cours de l'hiver 2001–2002, sept des 11 personnes qui ont péri dans des avalanches de neige dans la Cordillère canadienne ont perdu la vie dans le sud-est de la Colombie-Britannique (Canadian Avalanche Centre, 2002).

4.0 Base de données sur les glissements de terrain catastrophiques

Au total, 158 glissements de terrain sont répertoriés et décrits dans la base de données Microsoft® Access 2000. Ces événements sont surtout historiques; ils datent de la fin du 19e siècle, mais certains sont assez récents.

La figure 4-1 montre la zone à l'étude avec les endroits où se sont produits les glissements de terrain. À des fins de comparaison, les grandes zones peuplées ont aussi été incluses sur la carte, de même que les parcs provinciaux et fédéraux (zone verte), les équidistances (lignes vertes), les routes principales (lignes noires) et les rivières (lignes bleues). Cette carte ne reflète pas le nombre de glissements de terrain répertoriés étant donné que certains de ceux-ci ont plus ou moins les mêmes coordonnées et sont représentés par la même étoile. L'information de base sur ces 58 glissements est présentée au tableau 1.

Tableau 1 Tableau récapitulatif des glissements de terrain catastrophiques

Nom du glissement de terrain	Nom du lieu	Date de l'événement	Latitude (deg.-min.-sec.)	Longitude (deg.-min.-sec.)	Type de glissement important	Près d'une localité (o/n)	Présence d'infrastructures (o/n)	Type d'activités humaines dans la région
Sheep Creek	Rossland	1897-04-20	49-01-37.2	117-49-44.3	Coulée de débris	n	o	Construction d'une voie ferrée
Région de Sandon-Kaslo	Kaslo-Sandon	11/03/1900			Glissement rocheux	o	n	Exploitation minière
Bassin Rambler McGuigan, près de Kaslo	Kaslo	08/05/1902			Inconnu	n	n	
Lac Arrow supérieur	Forêt provinciale Arrowhead	28/02/1903	50-41-51.1	117-52-30.5	Chute de pierres	o	o	
Rossland	Rossland	01/04/1903	49-xx-xx	117-xx-xx	Inconnu	o	o	
Frank	Frank	29/04/1903	49-33-25.9	114-24-21.1	Avalanche de roches	o	o	Exploitation minière
Shelter Bay, lac Arrow supérieur	Forêt provinciale Arrowhead	11/03/1908	50-xx-xx	117-xx-xx	Glissement de terrain subaquatique	n	n	Exploitation forestière
Lac Okanagan, près de Penticton	Penticton	20/07/1951	49-xx-xx	119-xx-xx	Chute de limons	o	o	
Wynndel, près de Creston	Creston	02/04/1956	49-xx-xx	116-xx-xx	Coulée de débris	o	o	
(près de) Nelson	Nelson	07/04/1957	49-xx-xx	116-xx-xx	Coulée de débris	n	n	
Revelstoke	Revelstoke	12/12/1959			Glissement de débris	n	n	
Mont Bastion	Forêt provinciale du massif Shuswap	22/12/1959	50-46-xx	119-15-xx	Chute de pierres	o	o	
Twin Butte	Forêt provinciale Arrowhead	11/05/1961	51-00-29.1	118-00-11.5	Glissement de débris	n	o	
Camp Creek	Forêt provinciale Eagle	05/06/1968	50-59-27.6	118-28-39.7	Glissement de débris	n	o	

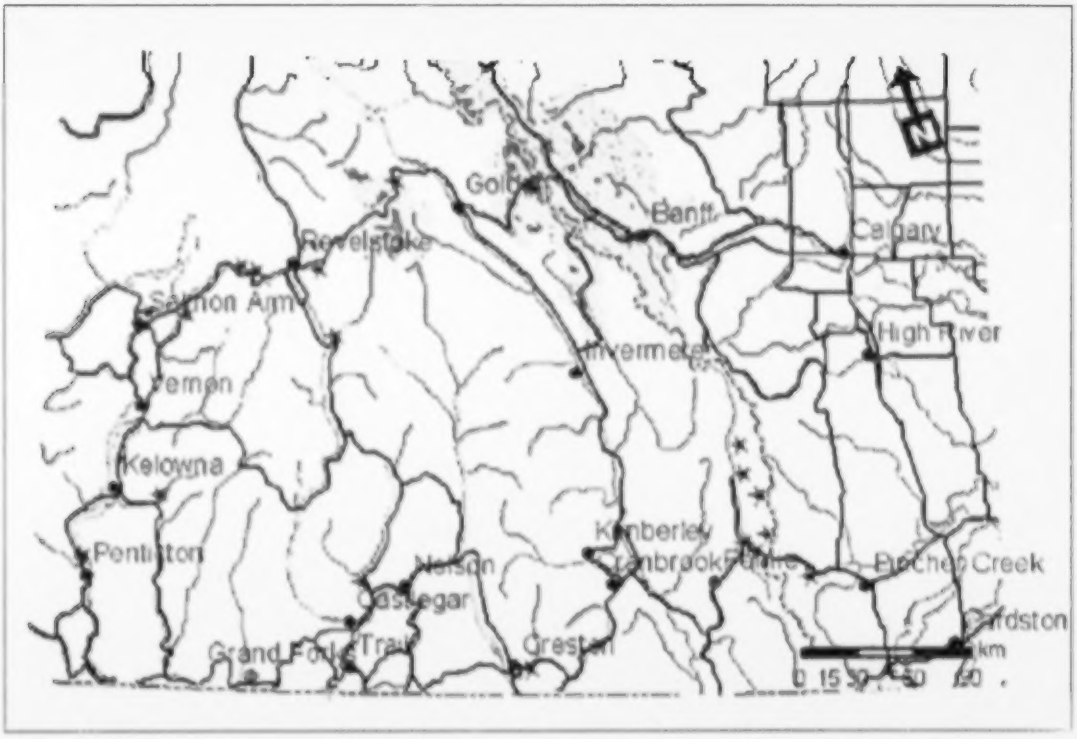
Nom du glissement de terrain	Nom du lieu	Date de l'événement	Latitude (deg.-min.-sec.)	Longitude (deg.-min.-sec.)	Type de glissement important	Près d'une localité (o/n)	Présence d'infrastructures (o/n)	Type d'activités humaines dans la région
Lac Victor, à l'est de Revelstoke	Revelstoke	26/08/1968			Chute de pierres	n	n	
WB, mine de houille Balmer, n° 2 - 40	Forêt provinciale Elk	23/11/1968	49-45-26.0	114-41-43.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
Natal	Sparwood	24/11/1968	49-43-27.4	114-51-56.3	Glissement de déchets de charbon	o	o	Exploitation minière
Crescent Valley, Slocan	Nelson	24/03/1969	49-xx-xx	117-xx-xx	Coulée de débris	n	n	
Summerland	Summerland	27/09/1970	49-36-00.5	119-39-17.4	Chute de limons	o	o	Irrigation
WB, terril du nord, galerie d'accès 29 - 42	Forêt provinciale Elk	05/05/1971	49-45-26.0	114-41-43.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
WB, KR, Six Mile Creek, Harmer Knob - 43	Forêt provinciale Elk	31/05/1971	49-45-26.0	114-41-43.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
Michel	Sparwood	20/03/1972	49-40-58.4	114-47-03.8	Glissement de déchets de charbon	o	o	Exploitation minière
FCL, terrils minier Clode, Projet 19 du mont Eagle	Forêt provinciale Elk	05/05/1972	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
FCL, terrils minier Clode, Projet 20 du mont Eagle	Forêt provinciale Elk	27/05/1972	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
WB, 6380 EL, galerie d'accès 29S - 44	Forêt provinciale Elk	23/05/1973	49-45-26.0	114-41-43.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
Kelowna	Kelowna	21/06/1974	49-xx-xx	119-xx-xx	Effondrement	o	n	Irrigation
FCL, terril minier Clode, Projet 24 du mont Eagle	Forêt provinciale Elk	08/11/1974	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
FCL, terril minier Clode, Projet 27 du mont Eagle	Forêt provinciale Elk	12/11/1974	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
WB, terril du sud, galerie d'accès 29 - 38	Forêt provinciale Elk	08/02/1976	49-45-26.0	114-41-43.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
1,5 km au nord de Vernon	Vernon	28/07/1976	50-14-xx	119-16-xx	Chute de limons	o	n	
Tunnel en spirale, vallée du col Kicking Horse	Parc national Yoho	06/09/1978	51-xx-xx	116-xx-xx	Coulée de débris	n	n	
Beaver Valley	Inconnu	07/07/1980			Avalanche de débris	n	n	

Nom du glissement de terrain	Nom du lieu	Date de l'événement	Latitude (deg.-min.-sec.)	Longitude (deg.-min.-sec.)	Type de glissement important	Près d'une localité (o/n)	Présence d'infrastructures (o/n)	Type d'activités humaines dans la région
WB, terril Bridge 3, Harmer II - 35	Forêt provinciale Elk	18/11/1980	49-45-26.0	114-41-43.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
Route transcanadienne, à l'est de Golden	Golden	21/08/1981	51-xx-xx	116-xx-xx	Chute de pierres	o	o	
WB, terril C-1, galerie d'accès 40 - 36	Forêt provinciale Elk	29/06/1982	49-45-26.0	114-41-43.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
LCM, West Line Creek, 1996 terril - 62	Forêt provinciale Elk	01/07/1982	49-57-00.0	114-45-20.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
WB, Greenhills, terril de la mine de houille Hawk - 75	Forêt provinciale Elk	20/03/1983	50-03-xx	114-52-xx	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
WB, Greenhills, terril est 2200 - 76	Forêt provinciale Elk	11/05/1983	50-03-xx	114-52-xx	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
FCL, ravin F, projet 162 du mont Eagle	Forêt provinciale Elk	01/06/1983	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
FCL, ravin est Brownie, projet 1du mont Eagle	Forêt provinciale Elk	11/06/1983	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
Mont Bastion	Forêt provinciale du massif Shuswap	23/11/1983	50-46-42.2	119-15-30.8	Chute de pierres	o	o	
FCL, Blaine, déblais 2 - 9	Forêt provinciale Elk	30/01/1984	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
FCL, ravin F Brownie , projet 5 du mont Eagle	Forêt provinciale Elk	24/07/1984	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
Mont Cathedral	Parc national Yoho	29/08/1984	51-24-30.8	116-23-29.7	Coulée de débris	n	o	
FCL, ravin D et E du déblais Brownie, projet 3 du mont Eagle	Forêt provinciale Elk	21/09/1984	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
FCL, ravin G Brownie, projet 7du mont Eagle	Forêt provinciale Elk	29/06/1985	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
WB, Greenhills, terril nord 2100 - 89	Forêt provinciale Elk	01/07/1985	50-03-xx	114-52-xx	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière

Nom du glissement de terrain	Nom du lieu	Date de l'événement	Latitude (deg.-min.-sec.)	Longitude (deg.-min.-sec.)	Type de glissement important	Près d'une localité (o/n)	Présence d'infrastructures (o/n)	Type d'activités humaines dans la région
FCL, déblais Balckspill, projet 16 du mont Eagle	Forêt provinciale Elk	17/07/1985	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
FCL, Brownie B, projet 6 du mont Eagle	Forêt provinciale Elk	16/08/1985	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
FCL, Brownie entre les déblais G et H, projet 11 du mont Eagle	Forêt provinciale Elk	16/09/1985	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
FCL, Blaine, déblais sud - 149	Forêt provinciale Elk	16/06/1986	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
WB, Greenhills, terril de déchets 2540 - 79	Forêt provinciale Elk	12/07/1986	50-03-xx	114-52-xx	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
FCL, déblais de remplacement Seam 13, projet 12 du mont Eagle	Forêt provinciale Elk	14/08/1986	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
FCL, terril d'urgence Blackstone, projet 14 du mont Eagle	Forêt provinciale Elk	05/10/1986	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
WB, Greenhills, terril de déchets est 2140 - 80	Forêt provinciale Elk	12/02/1987	50-03-xx	114-52-xx	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
WB, Greenhills, terril est 2200 - 81	Forêt provinciale Elk	07/03/1987	50-03-xx	114-52-xx	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
Penticton	Penticton	11/09/1989	49-xx-xx	119-xx-xx	Coulée de débris	o	n	
FCL, déblais sud - 155	Forêt provinciale Elk	26/10/1989	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
WB, Greenhills, terril nord 2025 - 156	Forêt provinciale Elk	22/11/1989	50-03-xx	114-52-xx	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
Crique Kilmarnorck	Forêt provinciale Elk	12/12/1989			Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
FCL, route d'accès du niveau 2, déblais sud - 153	Forêt provinciale Elk	29/05/1990	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
Crique Belgo	Kelowna	12/06/1990	49-55-13.1	119-06-57.5	Glissement plan	o	o	Exploitation forestière
Enderby	Enderby	12/06/1990	50-xx-xx	119-xx-xx	Coulée de débris	o	o	
Shuswap, mille 22.5	Forêt provinciale Eagle	13/06/1990	51-00-47.0	118-34-43.6	Glissement de terre	n	o	

Nom du glissement de terrain	Nom du lieu	Date de l'événement	Latitude (deg.-min.-sec.)	Longitude (deg.-min.-sec.)	Type de glissement important	Près d'une localité (o/n)	Présence d'infrastructures (o/n)	Type d'activités humaines dans la région
FCL, route d'accès du niveau 2, déblais sud – 154	Forêt provinciale Elk	07/07/1990	50-11-20.0	114-53-30.0	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
WB, Greenhills, Cougar 7	Forêt provinciale Elk	11/05/1992	50-03-xx	114-52-xx	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
Summerland	Summerland	15/09/1992	49-36-53.4	119-39-06.0	Chute de limons	o	o	Irrigation
Passage de Three Valley	Inconnu	09/04/1993			Chute de pierres	o	o	
Kelowna	Kelowna	20/08/1993	49-xx-xx	119-xx-xx	Inconnu	n	n	
Crique Kilmarnock	Forêt provinciale Elk	12/12/1993	49-xx-xx	119-xx-xx	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation minière
Mont Stephen	Parc national Yoho	03/08/1994	51-24-58.4	116-26-03.9	Coulée de débris	n	o	
Lac Kootenay	Nelson	20/01/1995			Chute de pierres	n	n	
Passmore	Passmore	25/04/1996	49-xx-xx	117-xx-xx	Inconnu	o	n	
(près de) Sparwood	Sparwood	10/09/1996	49-xx-xx	114-xx-xx	Glissement de déchets de charbon	n	n	Exploitation forestière
Winlaw	Nelson	10/10/1996	49-xx-xx	117-xx-xx	Inconnu	o	n	
Porte Est, Beaver Valley	Parc national des Glaciers	30/01/1997	51-25-53.5	117-26-38.6	Basculement rocheux	n	n	
Creston	Creston	27/03/1997	49-xx-xx	116-xx-xx	Inconnu	o	n	
Hummingbird Creek	Forêt provinciale Eagle	11/07/1997	50-46-10.1	118-58-12.2	Avalanche de débris	o	o	Exploitation forestière
Vallée Goat River	Erickson	31/05/1998	49-08-13.8	116-24-19.7	Coulée d'argile	n	o	Exploitation forestière
Shuswap, mille 9.5	Forêt provinciale Eagle	02/05/1999			Glissement rocheux	n	o	
Five-Mile Creek	Parc national Banff	04/08/1999	51-10-45.4	115-39-38.5	Coulée de débris	n	o	
Beaver Valley	Passmore	13/04/2000	49-32-09.7	117-38-08.8	Coulée d'argile	o	o	
Frank	Frank	03/06/2001	49-33-25.9	114-24-21.1	Chute de pierres	o	o	Exploitation minière
Vallée sud du fleuve Columbia	Eau de bordure aux battures du canal		50-xx-xx	116-xx-xx	divers	o	o	
Colline Ten Mile	Inconnu				Inconnu	n	n	
Mont Heather	Parc national des Glaciers		51-25-54	117-26-20	Inconnu	n	n	

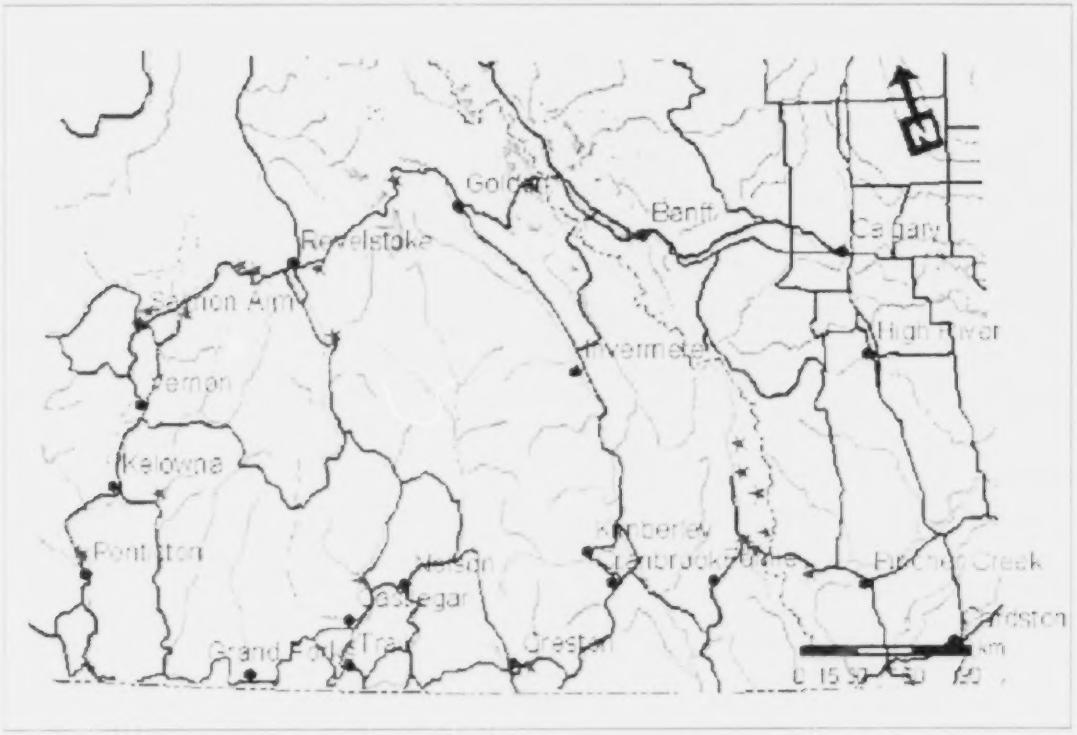
Figure 4-1 Zone à l'étude avec les endroits des glissements de terrain qui sont compris dans la base de données sur les glissements de terrain catastrophiques



Dans la base de données, un formulaire principal et six sous-formulaires ont été utilisés pour recueillir les données. Le formulaire principal est le formulaire de l'endroit et les sous-formulaires sont pour le glissement de terrain, le type de glissement de terrain, les impacts, les causes, le climat régional et la documentation. Ceux-ci semblaient être le meilleur moyen de représenter les données saisies. Ces formulaires et sous-formulaires ont été regroupés par leur champ d'application.

Le formulaire principal et les sous-formulaires ont habituellement un rapport un à plusieurs (p. ex., un endroit peut avoir plusieurs glissements de terrain), mais dans certains cas, les formulaires ont un rapport bi-univoque (p. ex., un glissement de terrain à un type de glissement de terrain). Même si l'utilisation d'un autre sous-formulaire pour un rapport bi-univoque est redondante, il a été créé pour mieux découper et classifier l'information. Pour obtenir plus d'information sur la base de données sur les glissements de terrain catastrophiques, veuillez communiquer avec les auteurs du présent rapport.

Figure 4-1 Zone à l'étude avec les endroits des glissements de terrain qui sont compris dans la base de données sur les glissements de terrain catastrophiques



Dans la base de données, un formulaire principal et six sous-formulaires ont été utilisés pour recueillir les données. Le formulaire principal est le formulaire de l'endroit et les sous-formulaires sont pour le glissement de terrain, le type de glissement de terrain, les impacts, les causes, le climat régional et la documentation. Ceux-ci semblaient être le meilleur moyen de représenter les données saisies. Ces formulaires et sous-formulaires ont été regroupés par leur champ d'application.

Le formulaire principal et les sous-formulaires ont habituellement un rapport un à plusieurs (p. ex., un endroit peut avoir plusieurs glissements de terrain), mais dans certains cas, les formulaires ont un rapport bi-univoque (p. ex., un glissement de terrain à un type de glissement de terrain). Même si l'utilisation d'un autre sous-formulaire pour un rapport bi-univoque est redondante, il a été créé pour mieux découper et classifier l'information. Pour obtenir plus d'information sur la base de données sur les glissements de terrain catastrophiques, veuillez communiquer avec les auteurs du présent rapport.

4.1 Analyse de la base de données sur les glissements de terrain catastrophiques

La base de données montre qu'au cours de la période de 1897 à 2001 (105 années), 109 personnes ont été tuées par des glissements de terrain dans le sud-est de la Cordillère. Environ 70 personnes (65 % du total) ont été tuées dans le glissement de Frank de 1903, une avalanche de roches qui a enseveli la ville minière de Frank, en Alberta (voir l'histoire de cas à la section 5.1.2). Quarante personnes (13 % du total) ont été tuées par des coulées de débris ou des avalanches de débris lords de six événements et sept personnes (6 % du total) ont été tuées par les ruptures de pentes bâties lors de trois événements. Huit personnes (7 % du total) ont été tuées par de petits glissements rocheux et de petites chutes de pierres lors de six événements.

Un total de 86 glissements de terrain sont enregistrés dans la base de données. Le type de glissement de neuf des événements n'a pu être établi. Les 77 événements qui restent sont considérés représentatifs des glissements de terrain qui se produisent dans la région. Les glissements de déchets de charbon étaient les plus courants (40; 52 %), suivis par les coulées rapides de débris provoquées par la pluie et les avalanches de débris (13; 17 %), par les chutes de pierres et les glissements rocheux de faible magnitude (11; 14 %), par les glissements de matériaux glacio-lacustres (9; 12 %) et, enfin, par les chutes de limons (4; 5 %). À notre connaissance, une seule avalanche de pierres s'est produite dans le passé (le glissement de Frank de 1903).

Trois événements ont généré d'importantes vagues de déplacement dans les lacs de la région, des édifices ont été endommagés ou des lignes d'énergie électrique et de communication ont été rompues par 12 événements, neuf glissements de terrain ont provoqué des déraillements sur des sentiers et 14 événements ont bloqué des routes.

5.0 Analyse d'histoires de cas de glissements de terrain catastrophiques

5.1 Glissements de terrain causés par une rupture d'une pente rocheuse

5.1.1 Vague générée par une chute de pierres, lac Arrow supérieur, Colombie-Britannique (82K/12); 28 février 1903

À 8 h 15 le 28 février 1903, une grande vague a été générée par une chute de pierres dans le lac Arrow supérieur, en Colombie-Britannique (les figures 5-1 et 5-2). La chute de pierres (dont le volume est évalué à environ 250 000 m^3) a pris naissance dans une falaise abrupte de phyllade située à environ 900 m au-dessus de la surface du lac (Brock, 1904).

Figure 5-1 Bateaux à roue arrière ancrés à l'appontement de Arrowhead, aux lacs Arrow, vers 1898. L'appontement a été endommagé, en 1903, par la vague générée par la chute de pierres. Le bateau à roue arrière *Rossland* (au centre) a subi le train de vagues à 11 km de l'impact. (Photographie A-00572 des archives de la Colombie-Britannique)

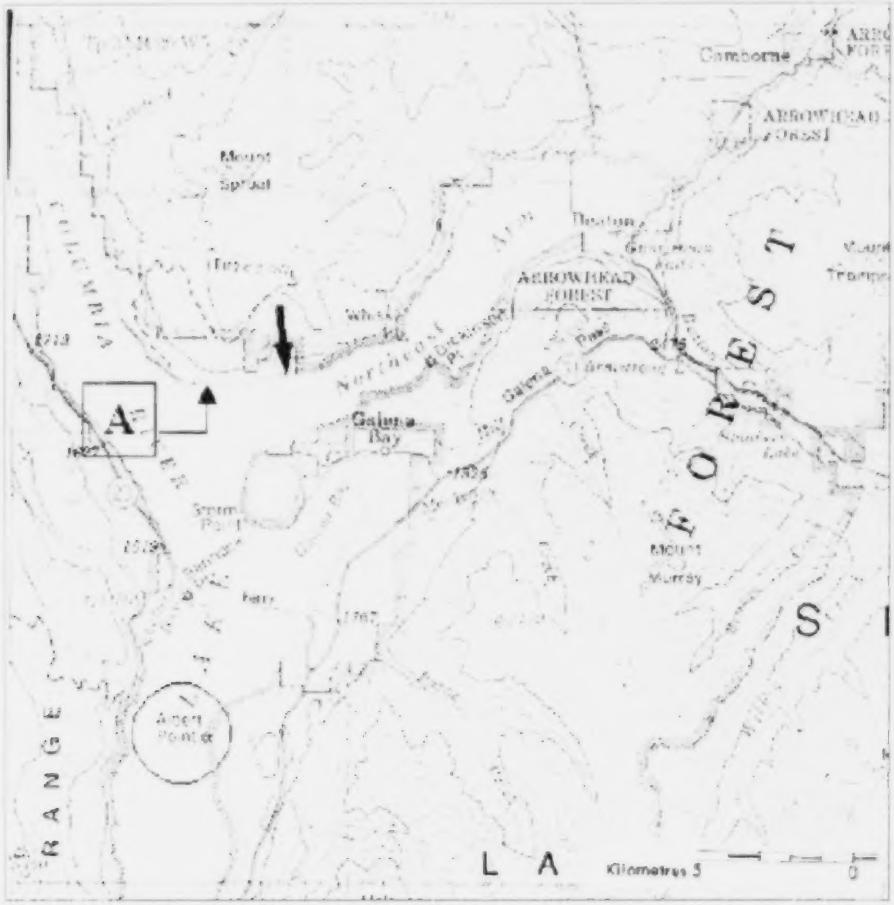
Lorsqu'elle a frappé le lac, la chute de pierres a généré des vagues atteignant 3 m de haut qui ont perturbé l'eau pendant une heure et ont créé des ravages dans la flotte naviguant sur le lac Arrow supérieur. Pendant le passage du train de vagues, les navires à vapeur et les barges à l'appontement du Canadien Pacifique de Arrowhead (figure 5-1) risquaient le naufrage *(The Weekly News*, Nelson, C.-B., 7 mars 1903) et les pilotis de l'appontement ont été (*Vancouver Daily Province*, 10 mars 1903). La glace sur le rivage du lac a été brisée et transportée par la vague à 18 m sur le littoral.

La force et la magnitude de la vague peuvent être mises en évidence en se référant à ses effets sur quatre gros bateaux à roue arrière. Le navire à vapeur *Kootenay* était ancré à l'appontement lorsque la vague a frappé. La vague a soulevé le navire à plus de 3,5 m, déchirant le câble d'arrimage. Comme le navire à vapeur était ramené par le retour de vague, la chambre avant a

été arrachée (*The Weekly News*, Nelson, 7 mars 1903). Le Brock (1904) rapporte que le *Revelstoke*, un navire à vapeur utilisé pour le remorquage, a été arraché de ses amarres, projeté sur la côte et tiré de nouveau par les vagues à trois reprises, alors que l'épave du navire à vapeur coulé *Nakusp* a été pris par la vague et entraîné dans un tourbillon comme un copeau de bois pendant plusieurs minutes avant de couler de nouveau (*Vancouver Daily Province*, 10 mars 1903; Brock, 1904).

À Albert Point, 11 km plus au sud (figure 5-2), le bateau à roue arrière *Rossland* (figure 5-1) a subi la perturbation (*Vancouver Daily Province*, 10 mars 1903) et n'a pas été endommagé.

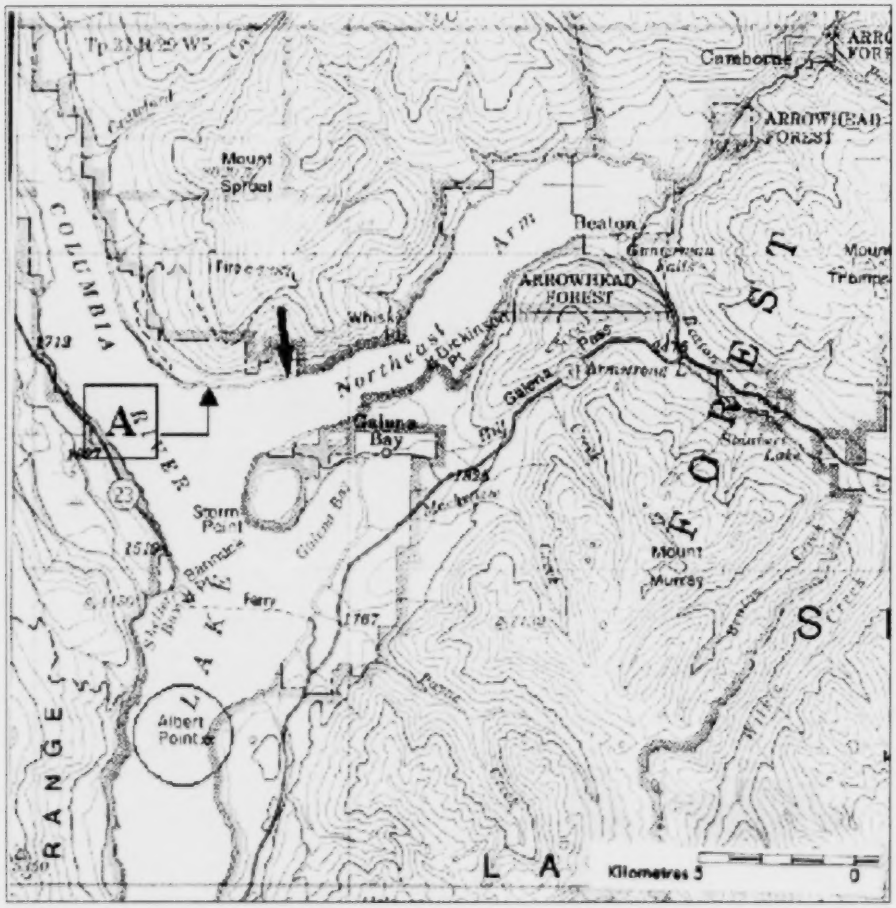
Figure 5-2 Plan de position de la vagie générée par la chute de pierres de 1903 à Arrowhead sur le lac Arrow supérieur, en Colombie-Britannique. L'endroit où s'est produit la chute de pierres est indiqué par la flèche noire. Dock endommagé par la vague générée par la chute de pierres à Arrowhead (A). Le bateau à roue arrière *Rossland* a navigué sur le train de vagues à Albert Point (encerclé), à 11 km de l'impact.



été arrachée (*The Weekly News*, Nelson, 7 mars 1903). Le Brock (1904) rapporte que le *Revelstoke*, un navire à vapeur utilisé pour le remorquage, a été arraché de ses amarres, projeté sur la côte et tiré de nouveau par les vagues à trois reprises, alors que l'épave du navire à vapeur coulé *Nakusp* a été pris par la vague et entraîné dans un tourbillon comme un copeau de bois pendant plusieurs minutes avant de couler de nouveau (*Vancouver Daily Province*, 10 mars 1903; Brock, 1904).

À Albert Point, 11 km plus au sud (figure 5-2), le bateau à roue arrière *Rossland* (figure 5-1) a subi la perturbation (*Vancouver Daily Province*, 10 mars 1903) et n'a pas été endommagé.

Figure 5-2 Plan de position de la vagie générée par la chute de pierres de 1903 à Arrowhead sur le lac Arrow supérieur, en Colombie-Britannique. L'endroit où s'est produit la chute de pierres est indiqué par la flèche noire. Dock endommagé par la vague générée par la chute de pierres à Arrowhead (A). Le bateau à roue arrière *Rossland* a navigué sur le train de vagues à Albert Point (encerclé), à 11 km de l'impact.



5.1.2 Avalanche de roches de Frank, en Alberta (82G/09); 29 avril 1903

Le glissement de Frank (figure 5-3) s'est produit à environ 4 h 10 le 29 avril 1903, sur le flanc est du mont Turtle dans le sud des montagnes Rocheuses de l'Alberta (McConnell et Brock, 1904; Daly et al., 1912; Anderson, 1968; Cruden et Beaty, 1987; Kerr, 1990). L'avalanche de roches a commencé lorsqu'une masse rocheuse ayant un volume d'environ 30 x 10^6 m^3 s'est soudainement brisée à la partie supérieure du mont et s'est écrasée sur sa pente nord-est (figure 5-4). La masse brisée s'étendait de 270 à 930 m au-dessus du fond de la vallée, lequel est à 1250 m ASL (mètres au-dessus du niveau de la mer). La masse, qui se désintégrait rapidement, a frappé le fond de la vallée de la rivière Crownest, la balayant d'un côté à l'autre pour ensuite monter la pente en terrasse opposée jusqu'à une hauteur maximale de 145 m au-dessus du niveau de la rivière (figure 5-3). Certains des débris sont revenus dans la vallée.

Selon des témoins, le mouvement entier a duré environ 100 secondes, mais peut avoir été plus court (McConnell et Brock, 1904). Cela donne une vitesse moyenne pour l'événement d'environ 31 m/s. Le choc des débris frappant le fond de la vallée a été senti distinctement par de nombreux habitants de Frank (Kerr, 1990) et le bruit du glissement a été décrit comme ressemblant à de la vapeur sous pression élevée qui s'échappe (McConnell et Brock, 1904). Plus de 2,5 km du fond de la vallée a été enseveli par jusqu'à 45 m de moellons de roche mêlés à de la boue et la rivière Crowsnest a été bloquée par les débris, formant ainsi un petit lac de barrage par le glissement de terrain.

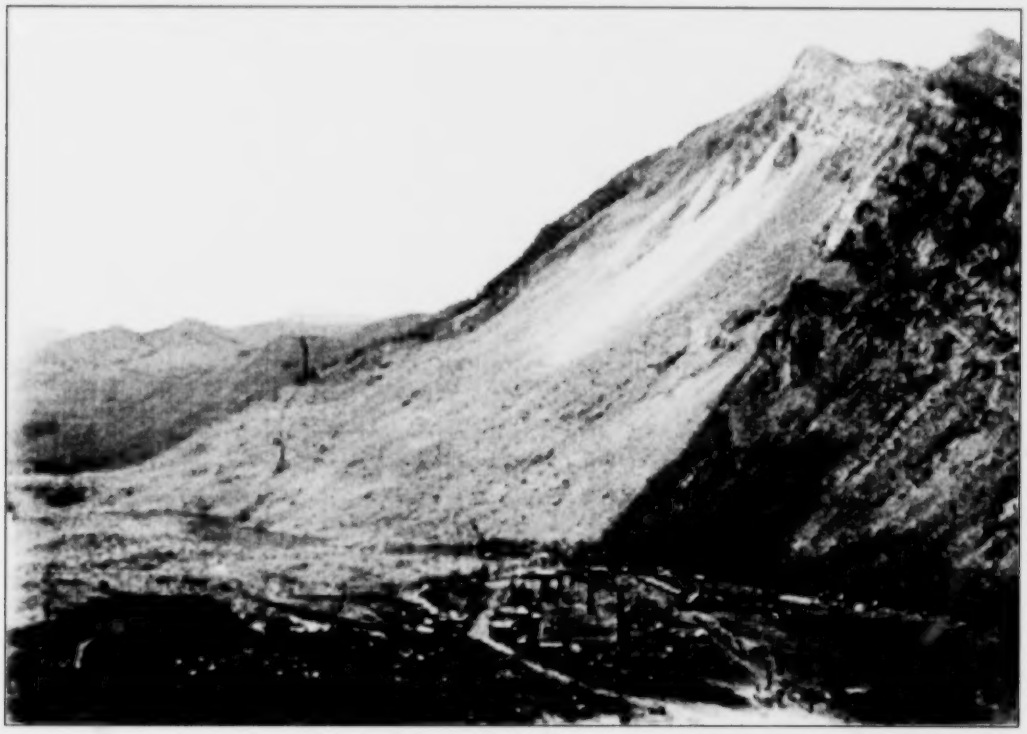
Environ 70 personnes ont péri dans les abords est et ouest de la ville de Frank au cours de la pire catastrophe causée par un glissement de terrain au Canada. Les pertes de vies auraient été beaucoup plus nombreuses si la masse du glissement avait frappé la partie principale de la ville un peu plus au nord (figure 5-4). Les propriétés détruites par l'avalanche de roches incluaient le culbuteur (un édifice où les déchets de roches sont retirés du charbon, puis chargés dans des wagons (Kerr, 1990)), les voies d'évitement et la machinerie à l'entrée de la mine de la Canadian American Coal and Coke Company, les étables de la compagnie et sept chalets du côté est de la ville de Frank, une demi-douzaine de maisons isolées et quelques cabanes et camps. La voie ferrée du Canadien Pacifique a été ensevelie sur une distance de plus de 2 km et 1,2 km d'embranchement partiellement achevé de la voie ferrée de Frank et du mont Grassy a également été enseveli. La grande partie des dommages dans le voisinage de Frank semble avoir été le résultat d'une vague de boue, formée par l'impact soudain de la charge de sédiments non drainés au fond de la vallée, qui a été poussée du dessous des débris se déplaçant rapidement (figure 5-5).

La rupture comprenait du calcaire d'immersion incliné de la formation de Livinsgstone du Mississipien (Norris, 1989). La base de la rupture s'étend parallèlement à l'axe du pli anticlinal du mont Turtle (figure 5-3) et touchait les strates dans le noyau de la structure au-dessus de la faille du mont Turtle. L'avalanche de roches s'est produite au cours d'une nuit extrêmement froide suivant une période de dégel printanier. La neige recouvrait encore des parties de la crête du sommet.

Figure 5-3 Vue aérienne oblique du mont Turtle et du glissement de Frank, en Alberta (NAPL T31L-213).

On savait que des fissures existaient le long du chaînon du mont Turtle avant le glissement de terrain (Dowlen, 1903; Burling, 1909). Un mineur avait dit qu'il avait dû sauter par-dessus de larges fissures dans la couronne du mont lors d'une expédition de chasse sur le mont Turtle à l'automne de 1902 (Blakemore, 1903).

Figure 5-4 Vue du mont Turtle et glissement de Frank peu après l'événement de 1903 (Glenbow Archives, Calgary, Alberta, photographie NC-2-355a).



Les effets de l'exploitation de la houille à la base du mont Turtle, qui a débuté en 1901, sur la stabilité de la pente ont souvent fait l'objet de discussion (p. ex., Dowlen, 1903; Daly et al., 1912; Krahn and Morgenstern, 1976; Seager, 1996), mais le rôle qu'a joué l'activité humaine dans le déclenchement de la catastrophe demeure incertain. Cependant, Daly et al. (1912) en est arrivé à la conclusion que le mouvement des parois de la mine, dû à l'extraction du charbon, a été déterminant dans l'affaiblissement du pic et a été possiblement directement responsable du glissement de terrain. Ils ont ajouté qu'on ne pouvait ignorer le fait que la partie du mont, qui s'est écroulée ne 1903, était située exactement à l'opposé à la zone de grandes chambres et correspondait à la longueur de ces dernières et qu'il ne pouvait s'agir que d'une simple coïncidence.

Figure 5-5 Maisons détruites à Frank par de la boue expulsée du dessous des débris de l'avalanche de roches et produite par l'impact des débris sur le fond de la vallée (Glenbow Archives, Calgary, Alberta, photographie NA-2111-6).

La couronne du glissement de Frank est actuellement surveillée pour en déceler des indications de mouvement catastrophique éventuel (Cruden, 1982a, 1986).

5.1.3 Chutes de pierres du mont Bastion, en Colombie-Britannique (82L/14) le 22 décembre 1959 et le 23 novembre 1983

Le mont Bastion s'élève à environ 900 m au-dessus du lac Shuswap, à 9 km au nord de Salmon Arm, en Colombie-Britannique. Le versant sud du mont est une paroi rocheuse escarpée de calcaire triasique de la formation de Sicamous qui a été le centre de chutes de pierres fréquentes (Evans et Hungr, 1993). Des pentes d'éboulis partiellement végétalisées entourent la base de la falaise.

L'une des trois chutes de pierres de la partie est de la falaise, qui s'est produite le 22 décembre 1959, a été photographiée par un résidant de la localité (*Vancouver Sun*, 23 décembre 1959; figure 5-6). Ces chutes de pierres n'ont fait aucune victime, mais à Sunnybrae et à Tappen, à proximité immédiate, la poussière produite par les chutes de pierres « ressemblait à de la neige ». Les chutes de pierres étaient prévues depuis plusieurs années étant donné qu'une fissure dans la montagne avait commencé à s'élargir (*Vancouver Sun*, 22 décembre 1959).

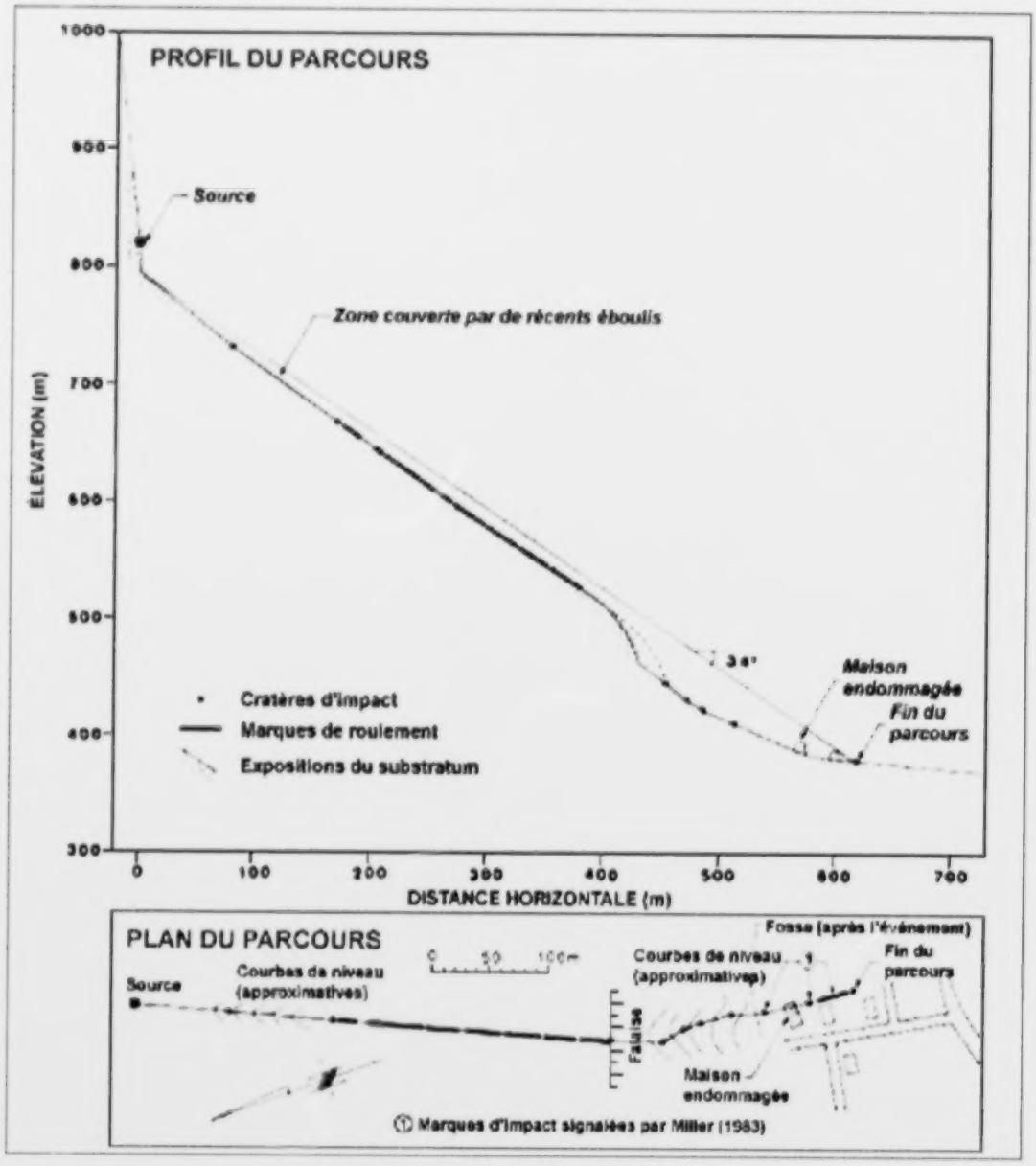
Figure 5-6 Chute de pierres du mont Bastion le 22 décembre 1959. Le lac Shuswap est en avant-plan. La vue est vers l'ouest (photographie offerte par M[me] Dorothy Brook).

En 1983, toutefois, à 1 h 50 le 23 novembre, un seul gros rocher en forme de roue (d'environ 6 m de diamètre) s'est détaché de la partie ouest du mont Bastion, a rebondi et roulé dans une pente d'éboulis légèrement boisée et a frappé une zone résidentielle du chemin Begbie (Hungr et Evans 1988, 1989; Evans et Hungr, 1993; figure 5-7). Avant de s'arrêter, le rocher, qui pesait environ 150 tonnes, a partiellement détruit une maison, tuant deux personnes alors qu'elles dormaient (*Salmon Arm Observer*, 30 novembre 1983; figure 5-7).

Figure 5-7 La chute de pierres de Sunnybrae de 1983. Dommages à une maison du chemin Begbie subis lorsqu'un rocher a fracassé la maison. Deux personnes ont été tuées alors qu'elles dormaient. (Photographie du Ministry of Transportation and Highways de la Colombie-Britannique, le 23 novembre 1983.)

La chute de pierres a parcouru une distance de 750 m le long de la pente (figure 5-8). Miller (1983) signale qu'une petite roche avait frappé la maison en 1982, mais n'avait causé que de légers dommages.

Figure 5-8 Parcours de la chute de pierre de Sunnybrae de 1983 relevé en 1987 (d'après Evans et Hungr, 1993, figure 18).



5.1.4 Chute de pierres le long du lac Kootenay, près de Procter, en Colombie-Britannique (82F/10) le 20 janvier 1995

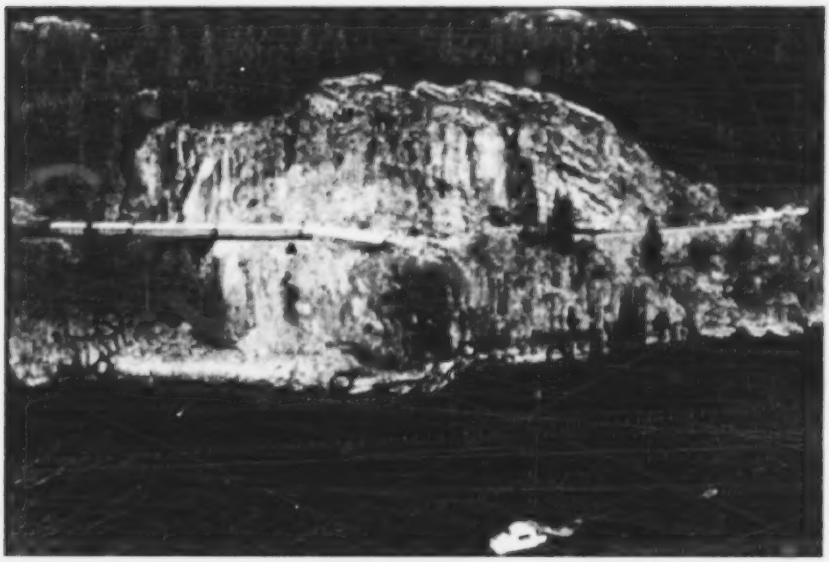
Le 20 janvier 1995, un train de marchandises du CP a déraillé lorsqu'il a frappé des débris d'une chute de pierres alors qu'il circulait le long de la rive ouest du lac Kootenay (figure 5-9). Les trois locomotives et deux wagons de marchandise ont quitté le rail et ont dégringolé sur 30 m le long de la falaise jusque dans les eaux du lac Kootenay (figure 5-9). Deux agents de train sont morts lors du plongeon (Bureau de la sécurité des transports, 1995).

La roche, dont est faite la pente où s'est produite la chute de pierres, est constituée de granite résistant bien lié de pluton de la crique Heather (Leclair, 1986). La direction du mouvement initial de la chute de pierres allait de 50E à 62NE. La matière même du rocher et la géométrie de la pente remaniée du site prédispose au basculement qui est sans doute la cause la plus probable de détachement. Le volume de la chute de pierres a été évalué à 144 m^3 (Bureau de la sécurité des transports, 1995).

Les données climatiques indiquaient que la chute de pierres avait été déclenchée par l'apparition de conditions de gel après une période de dégel de 11 jours qui avait suivi un début de mois de janvier très froid. La pluie s'était également abattue pendant la période de dégel, ajoutant ainsi de l'eau qui pouvait geler dans les interstices (fissures ou joints ouverts) de la masse rocheuse.

L'histoire de cas illustre l'impact destructif que peut avoir une petite chute de pierres et est représentative des incidents impliquant des chutes de pierres occasionnelles tout au long de l'existence du chemin de fer dans le sud-est de la Cordillère.

Figure 5-9 Survol aérien du site où a eu lieu la chute de pierres et la scène du déraillement qui s'est produit le 20 janvier 1995. Remarquez les pentes rocheuses abruptes au haut du déboisement jusqu'au niveau du lac affublé de joints plongeants inclinés. Le nord est à la droite. (Photographie de la GRC.)



5.1.5 Glissements rocheux dans la vallée de la rivière Beaver et glissement de terrain de la Porte Est, parc national des Glaciers, Colombie-Britannique

Des mouvements de la pente montagneuse ont été observés à de nombreux sites du parc national des Glaciers, en Colombie-Britannique. Cette partie de la chaîne Columbia se caractérise par des vallées plus profondes que la normale en raison des glaciers et par des pentes montagneuses abruptes dont le sous-sol est constitué par des roches métamorphiques complexes; le paysage est spécialement prédisposé aux mouvements importants des pentes.

La vallée de la rivière Beaver forme la voie d'accès est au col Rogers et est particulièrement touchée par des mouvements profonds de la pente. Plusieurs mouvements de pente ont été étudiés (p. ex., Pritchard et al., 1989; Pritchard et Savigny, 1991; Couture et Evans, 2000b). D'importants glissements de terrain profonds sur les pentes de la vallée de la rivière Beaver causent des problèmes à la maintenance sur la voie ferrée du CPR et la route transcanadienne.

La majorité des glissements de terrain dans la vallée Beaver se sont produits sur les pentes est et dans la division du gros sable et du schiste ardoisier du groupe précambrien de Horsethief Creek. De nombreux glissements de terrain sont visibles sur des photographies aériennes et sont tracés sur la carte par photographie aérienne et topographique de 1999 illustrée à la figure 5-10. Les déformations de la pente sont reconnaissables par le terrain accidenté en bosse et en creux comparativement à la surface lisse des pentes non perturbées adjacentes. L'importance de l'empreinte laissée par ces déformations de terrain varie de 0,25 km^2 à 5 km^2. Ces zones de mouvements post-glaciaires de la pente sont des glissements de terrain profonds montrant des caractéristiques en forme de bol ayant un escarpement de la tête semi-circulaire et des fronts bombés.

Sur les flancs ouest de la vallée de la rivière Beaver, au moins six mouvements de masse ont été identifiés (Pritchard et al., 1989; Pritchard et Savigny, 1990). Au glissement de Griffith, on mesure depuis longtemps déjà des déformations progressives générant un mouvement des débris et provoquant un déplacement de la ligne du CPR, depuis qu'il existe. Pritchard et al. (1989) a déposé un rapport sur les résultats de la surveillance de la pente qui indiquaient des déformations allant jusqu'à environ 30 mm pendant une période de surveillance qui a duré un mois. Identifié par le passé comme étant un mode circulaire de rupture, le glissement de Griffith est maintenant reconnu comme étant les phases finales d'une rupture massive antérieure de la tête (Pritchard et al., 1989).

Le glissement de Heather Hill (figure 5-10) est situé sur les pentes ouest de la vallée de la rivière Beaver. Les signes évidents sur le terrain, l'analyse cinématique de même que la modélisation numérique confirment que la déformation de la tête est la principale cause de rupture qui se délimite par une surface de rupture curviligne (Pritchard et Savigny, 1990; Pritchard et Savigny, 1991).

En ce qui a trait au glissement de la Porte Est (figure 5-11), à la fin de mai 1999, les débris de la coulée de boue ont couvert la route transcanadienne à 1,5 km au nord de la Porte Est du parc national des Glaciers dans la vallée Beaver. Les débris provenaient de débris d'un glissement de roches qui se désintégraient et qui s'est produit deux ans auparavant, bien au-delà de la route dans une région de rupture active de la pente rocheuse (Couture et Evans, 2000b, 2002),

maintenant connu comme le glissement de la Porte Est. En janvier 1997, une réactivation d'un glissement de terrain post-glaciaire très important a été portée à l'attention des responsables du parc national des Glaciers. Le glissement de terrain actuel implique des ruptures de substratum régressif sur un escarpement de la tête très abrupte composé de roches du précambrien (figure 5-11). Pendant une période relativement courte (environ 28 mois), les débris générés par la désintégration des effondrements du substratum ont dévalé la pente de la montagne sur une distance de 3,4 km. Une petite quantité de débris a atteint la route à la fin mai 1999 (figure 5-11), fort heureusement sans conséquences désastreuses. Dans les semaines et les mois qui suivirent, le rocher, qui a glissé, s'était légèrement désintégré et avait déboulé la pente. Au début juin 1999, les équipes d'entretien des routes du parc national avaient enlevé environ 6000 m^3 de débris de la route transcanadienne. À la fin de juillet, ils avaient enlevé 15 000 m^3.

Depuis 1999, les coulées de débris se sont produites chaque année pendant la période de fonte de neige qui a lieu habituellement pendant mai et juin. Les coulées de débris au glissement de la Porte Est sont fortement influencées par les conditions hydrologiques de la pente et des conditions météorologiques défavorables peuvent générer des coulées de débris plus importantes que celles que nous avons connues jusqu'à maintenant.

Une berme servant de barrière et un bassin pour recueillir les débris ont été construits juste au-dessus de la route transcanadienne afin de la protéger des coulées de débris provenant du glissement de terrain de la Porte Est la surplombant.

Figure 5-10 Vue aérienne de la partie inférieure du glissement de la Porte Est (coin supérieur droit). La route transcanadienne passe à la base de la pente, au-dessus de la rivière Beaver. Remarquer la berme et le bassin de récupération construits au-dessus de la route transcanadienne afin de la protéger des coulées de débris provenant des débris du glissement de terrain de la Porte Est. Le glissement de Heather Hill est visible dans le coin supérieur gauche et l'instabilité de type « soupe populaire » peut être constatée à la droite de la berme, juste au-dessus de la route transcanadienne. (Photographie de S. G. Evans, août 2002.)

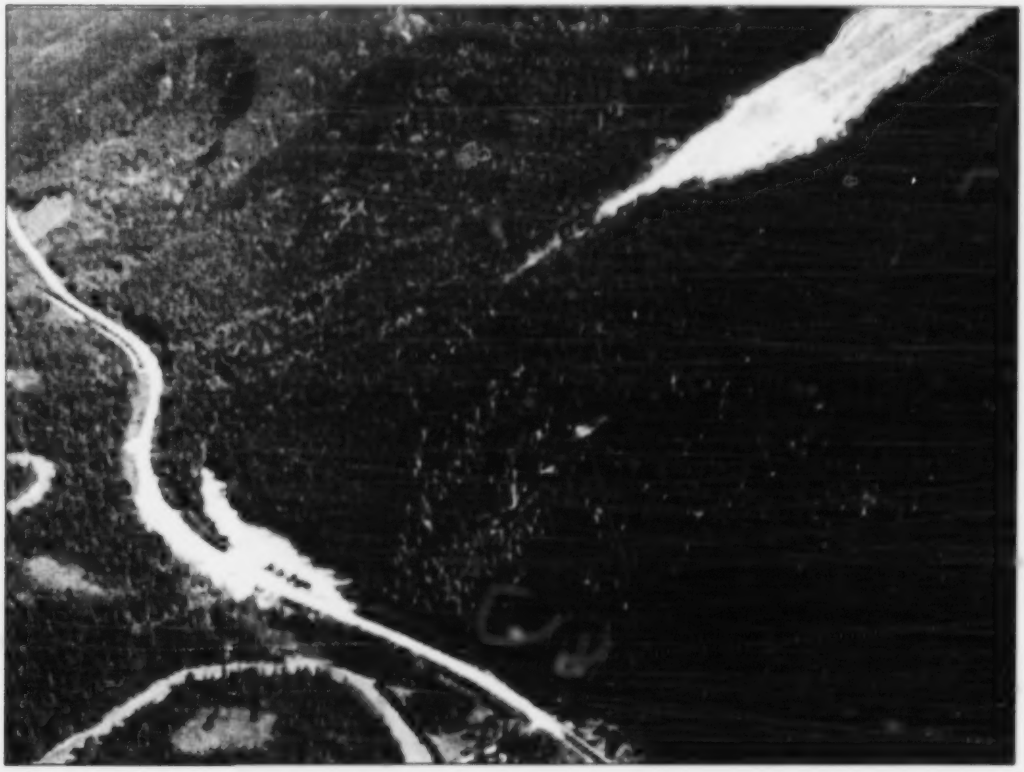


Figure 5-11 a) Photographie aérienne à l'échelle 1:30 000 (Foto-Flight, 1999, n° 99043-L1-3) et b) carte topographique à l'échelle 1:50 000 (SNRC n° 82/N-6) de la vallée de la rivière Beaver à proximité du glissement de la Porte Est (EGL). Les limites des ruptures de pente anciennes et récentes sont tracées sur les deux images. **BB** : zone de coulées de débris de la berme de Beaver; **HH** : glissement de terrain de Heather Hill; **SK** : zone de coulées de débris de la « soupe populaire ». Remarque : équidistance sur la carte topographique = 100 pieds (33,3 m). (De Couture et Evans, 2000b)

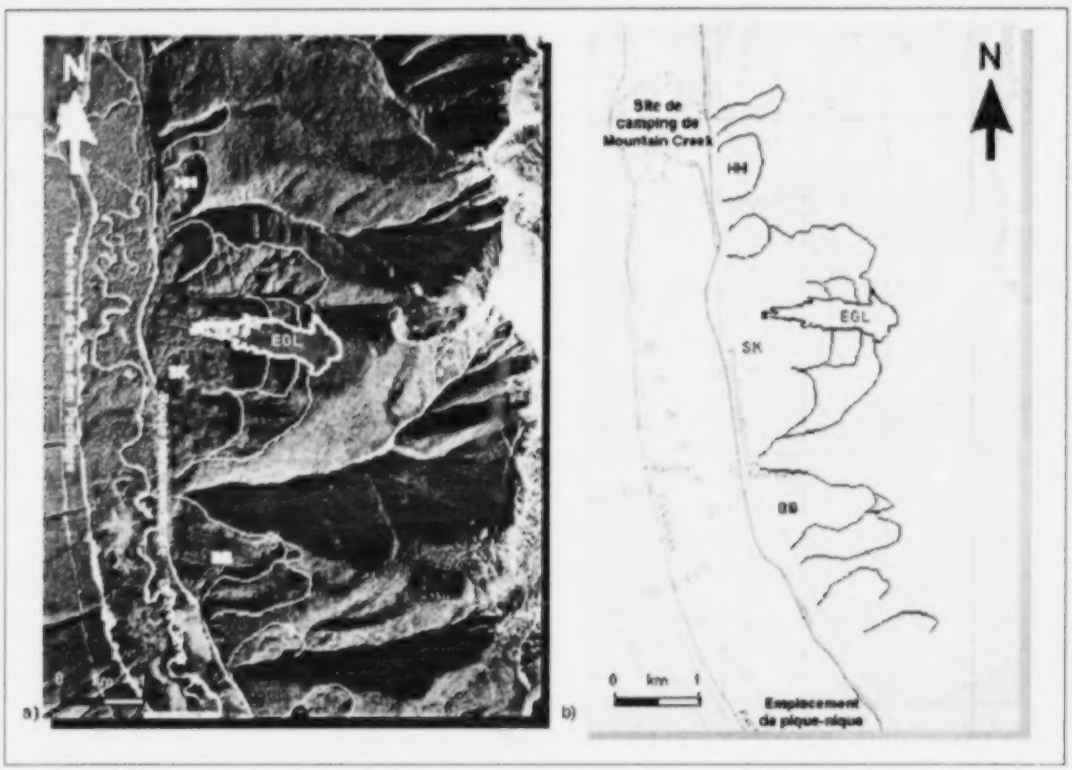
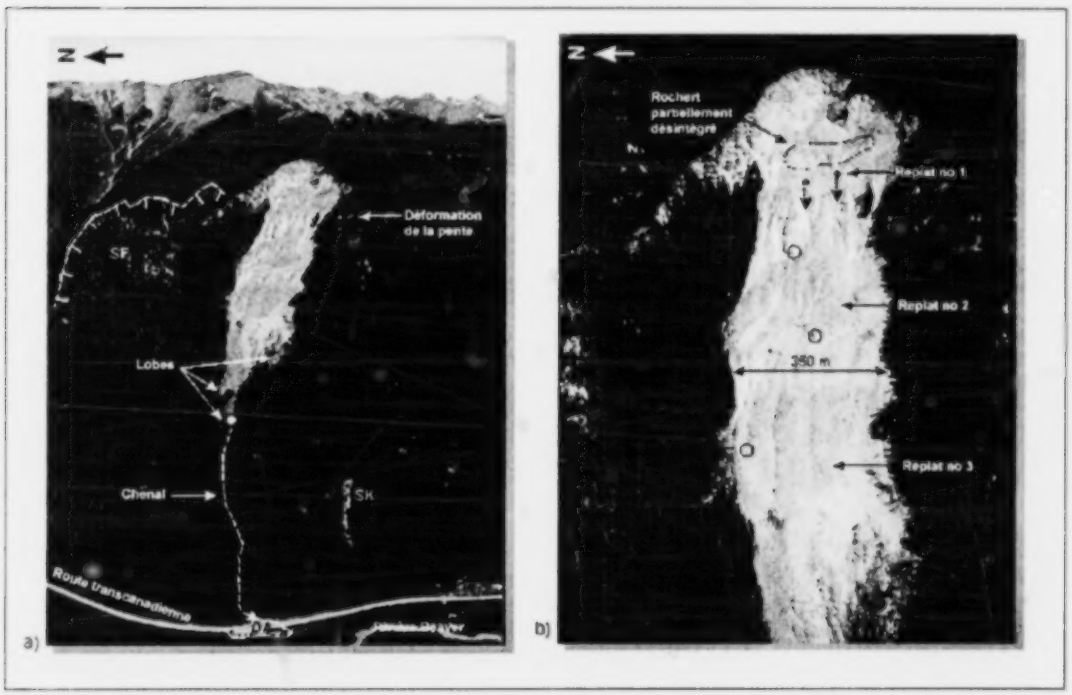


Figure 5-12 a) Vue aérienne oblique du glissement de la Porte Est. La déformation de la pente est identifiée sur les pentes sud de l'escarpement de la tête du glissement (SF); b) gros plan de la partie supérieure du glissement de la Porte Est. Trois zones d'accumulation de débris, identifiées par les replats n^{os} 1 à 3, indiquent des déplacements permanents et lents de la pente. Quelques gros rochers peuvent être identifiés au niveau du replat n^{o} 2 et du replat n^{o} 3 (encerclés). DA : zone d'accumulation de la coulée de débris de 1999; SK : zone de coulées de débris de type « soupe populaire ». (De Couture et Evans, 2000b)



5.1.6 Glissement rocheux– avalanche de débris de Clanwilliam, Eagle Pass, chaîne Columbia, Colombie-Britannique, mai 1999

En mai 1999, un glissement rocheux et une avalanche de débris se sont produits dans la partie nord de la chaîne de Monashee, à environ 15 km à l'ouest de Revelstoke, le long du corridor formé par la voir ferrée du Canadien Pacifique et la route transcanadienne (figure 5-13). Une partie des débris a frappé les rails du Canadien Pacifique (CP Rail), entraînant ainsi un arrêt temporaire du trafic ferroviaire. La plupart des débris ont été déposés dans la pente où le voie ferrée passe dans un tunnel à la base de la pente (figure 5-13). Le glissement rocheux et l'avalanche de débris n'ont pas touché la route transcanadienne, située du côté opposé de la vallée.

Le volume de roches qui s'est détaché de la falaise source, 470 m au-dessus du fond de la vallée, est évalué à 75 000 m^3. Ce volume a été augmenté par l'entraînement des colluvions dans son

Figure 5-11 a) Photographie aérienne à l'échelle 1:30 000 (Foto-Flight, 1999, n° 99043-L1-3) et b) carte topographique à l'échelle 1:50 000 (SNRC n° 82/N-6) de la vallée de la rivière Beaver à proximité du glissement de la Porte Est (EGL). Les limites des ruptures de pente anciennes et récentes sont tracées sur les deux images. **BB** : zone de coulées de débris de la berme de Beaver; **HH** : glissement de terrain de Heather Hill; **SK** : zone de coulées de débris de la « soupe populaire ». Remarque : équidistance sur la carte topographique = 100 pieds (33,3 m). (De Couture et Evans, 2000b)

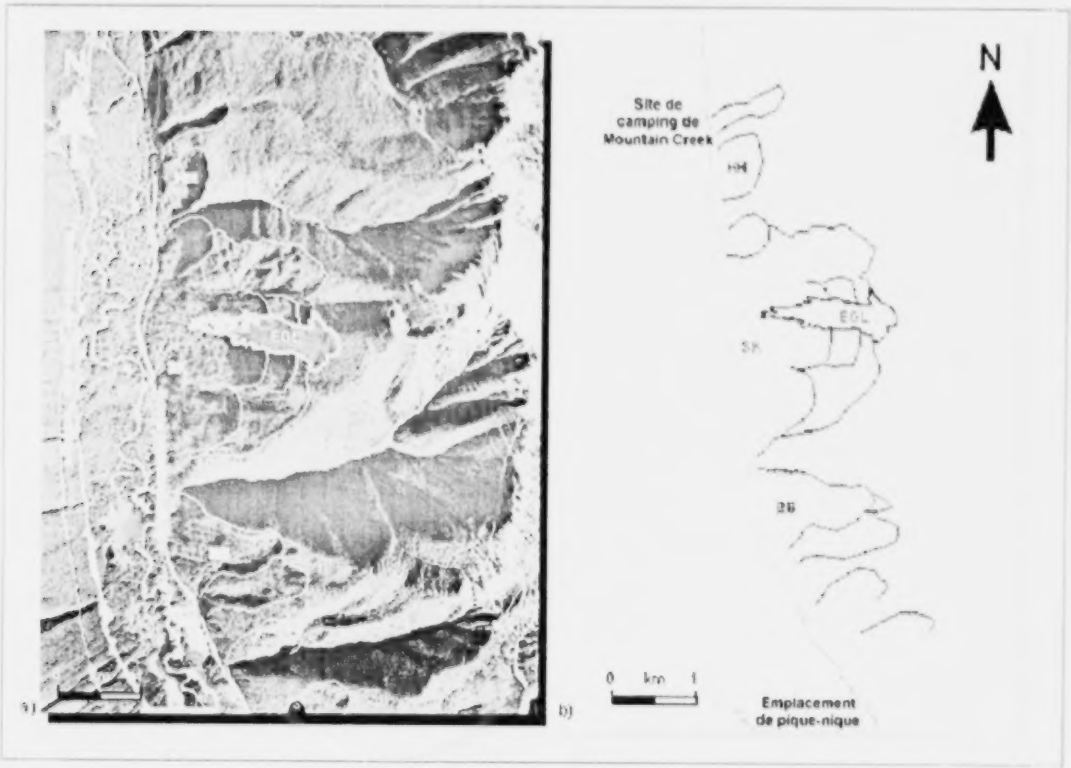
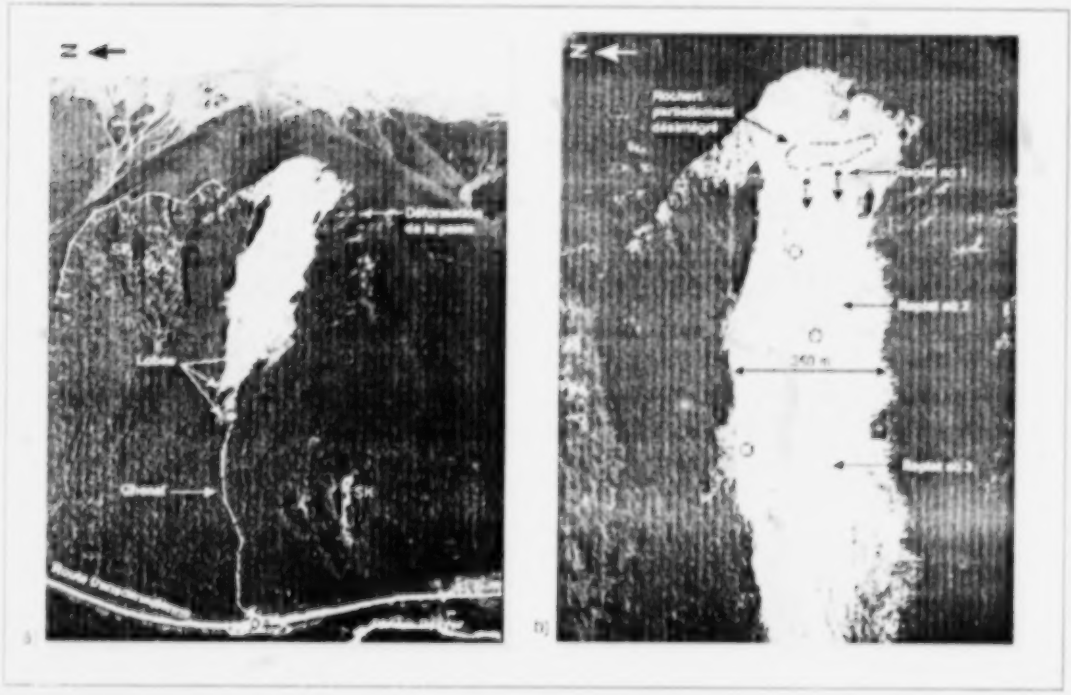


Figure 5-12 a) Vue aérienne oblique du glissement de la Porte Est. La déformation de la pente est identifiée sur les pentes sud de l'escarpement de la tête du glissement (SF); b) gros plan de la partie supérieure du glissement de la Porte Est. Trois zones d'accumulation de débris, identifiées par les replats n^{os} 1 à 3, indiquent des déplacements permanents et lents de la pente. Quelques gros rochers peuvent être identifiés au niveau du replat n^{o} 2 et du replat n^{o} 3 (encerclés). DA : zone d'accumulation de la coulée de débris de 1999; SK : zone de coulées de débris de type « soupe populaire ». (De Couture et Evans, 2000b)



5.1.6 Glissement rocheux – avalanche de débris de Clanwilliam, Eagle Pass, chaîne Columbia, Colombie-Britannique, mai 1999

En mai 1999, un glissement rocheux et une avalanche de débris se sont produits dans la partie nord de la chaîne de Monashee, à environ 15 km à l'ouest de Revelstoke, le long du corridor formé par la voie ferrée du Canadien Pacifique et la route transcanadienne (figure 5-13). Une partie des débris a frappé les rails du Canadien Pacifique (CP Rail), entraînant ainsi un arrêt temporaire du trafic ferroviaire. La plupart des débris ont été déposés dans la pente où la voie ferrée passe dans un tunnel à la base de la pente (figure 5-13). Le glissement rocheux et l'avalanche de débris n'ont pas touché la route transcanadienne, située du côté opposé de la vallée.

Le volume de roches qui s'est détaché de la falaise source, 470 m au-dessus du fond de la vallée, est évalué à 75 000 m^3. Ce volume a été augmenté par l'entraînement des colluvions dans son

sillon. Le glissement rocheux initial était constitué de gneiss du complexe de Monashee du Paléozoïque inférieur (Johnson, 1990). Le complexe comporte généralement du schiste, du quartzite, du marbre, du para-gneiss et de l'ortho-gneiss; la foliation et la schistosité sont orientées NO-SE (N135°) et s'inclinent d'environ 37° SO. L'analyse dynamique à la suite de la rupture de l'avalanche de roches en arrive à la conclusion que la vitesse de la phase avalanche de débris du mouvement a atteint 30 m/s (Hungr et al., 2000).

Figure 5-13 Vue aérienne oblique du glissement rocheux – avalanche de roches au mille 9,5 de Shuswap situé près du lac Clan William sur les pentes nord de la vallée de la rivière Eagle, à Eagle Pass. La voie ferrée du CPR passe à la base de la pente et traverse un tunnel où les débris atteignent la base de la pente (photographie de R. Couture, août 1999).

5.2 Coulées de débris et avalanches de débris

5.2.1 Coulée de débris de la crique Little Sheep, près de Rossland, en Colombie-Britannique (82F/04) le 20 avril 1897

Une coulée de débris a frappé un campement d'entretien de la voie ferrée, comportant une cuisine mobile, un baraquement et plusieurs tentes, à 2 h 20, le 20 avril 1897 sur la voie ferrée de Red Mountain, le long de la crique Little Sheep à 1,6 km au nord de la frontière internationale, près de Rossland, en Colombie-Britannique (*Daily Colonist*, 21–22 avril 1897). Les 12 membres de l'équipe des chemins de fer dormaient à points fermés lorsqu'ils ont été réveillés par le bruit produit par la coulée de débris, un grondement qu'un des survivants avait décrit comme étant « le déraillement d'un wagon qui rebondissait sur les traverses ». Sept membres de l'équipe ont été tués, quatre ont survécu après avoir été ensevelis dans les débris et une personne s'en est tirée indemne. La coulée de débris était très importante et avait un volume évalué à plus de 50 000 m^3 (*Rossland Weekly Miner*, le 22 avril 1897)

5.2.2 Coulée de débris de Twin Butte, vallée Illecillewaet, près de Revelstoke (82N/04-82M/01) le 11 mai 1961

Vers 20 h 30 le 11 mai 1961, un train de marchandises du CP Rail, qui circulait en direction ouest dans la vallée Illecillewaet et qui se dirigeait vers Revelstoke, est entré en collision avec une coulée de débris à Twin Butte. Quatre locomotives diesel et 18 wagons couverts, transportant du blé provenant des Prairies et destiné à Vancouver, ont déraillé. Personne n'a été blessé lors de l'accident. L'incident est très intéressant en raison du litige qui s'ensuivit au cours duquel la Commission canadienne du blé (Sa Majesté la Reine) a présenté une demande ne dommages-intérêts au Canadien Pacifique Limitée pour ne pas avoir livré le blé à Vancouver. Ce procès est résumé dans le jugement de 1965 rendu par la Court de l'Échiquier du Canada, et comportait des points d'éclaircissement sur l'évaluation des dangers liés aux glissements de terrain et de l'acceptation des risques.

La coulée de débris s'est produite dans un bassin hydrologique escarpé du côté sud de la vallée Illecillewaet au mille 116,5 de la sous-division montagneuse du CP Rail. Les débris ont recouvert les rails sur environ 30 m et sur une profondeur atteignant 3 m. La coulée de débris s'est produite moins de 3 heures avant l'arrivée du train. Aucune pluie n'est tombée cette journée-là, ni d'ailleurs depuis un certain temps avant l'incident. On suppose que la coulée de débris provient d'un glissement de débris bien au-dessus de la voie ferrée. Le glissement a bloqué le courant et la brèche subséquente du blocage a déclenché la coulée de débris du 11 mai. D'autres glissements de terrain se sont produits dans le bassin hydrologique escarpé et étaient visibles sur des photographies aériennes, un fait qui est devenu un point important de preuve dans le cas en question.

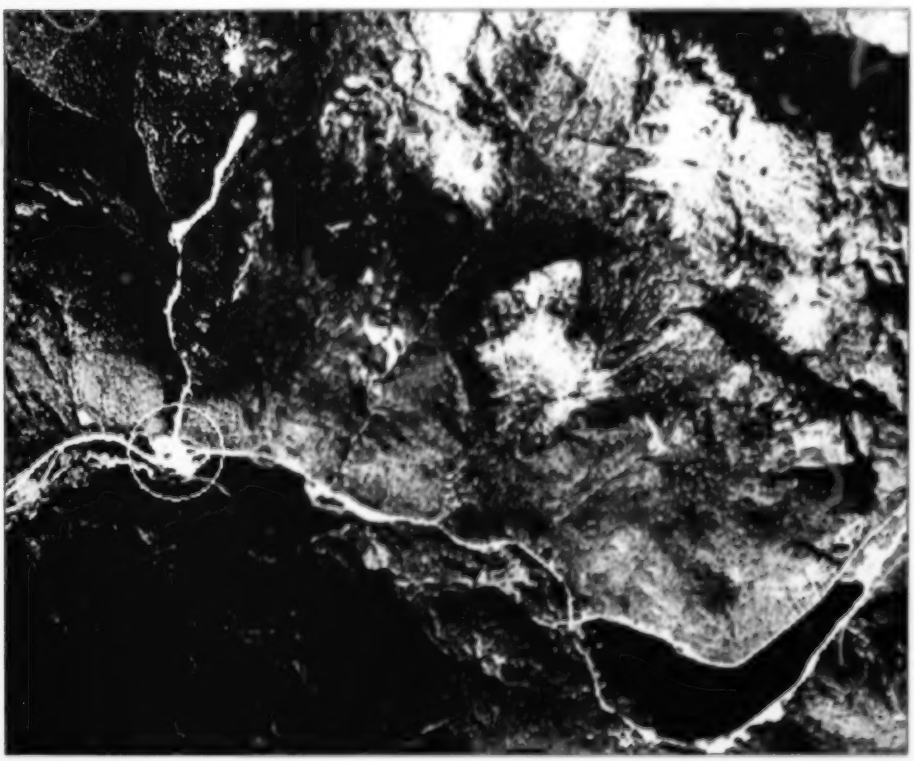
Dans son jugement, l'honorable juge Dumoulin n'a pas tenu compte de l'argument du défendeur à l'effet que la coulée de débris était un « acte de Dieu...qui... ne pouvait être prévu et contre lequel on ne pouvait se protéger » et a accordé à la Commission canadienne du blé la somme de 46 199,95 $ (en dollars de 1965), soit la valeur du blé perdu. Le coût total du déraillement de 1961 pour le CP Rail, incluant les réparations des moteurs diesel, du matériel roulant, des rails et des signaux s'est chiffré à 130 000 $ (en dollars de 1961). Après la coulée de débris de 1961, une clôture d'avertissement a été érigée au mille 116,5 afin de protéger la voie ferrée.

Un incident semblable s'était produit au mile 86,7 le 14 juin 1958, lorsqu'un autre train était entré en collision avec une coulée de débris provoquant le déraillement de quatre locomotives diesel et de 10 wagons remplis de blé. Dans ce dernier cas, la Court de l'échiquier du Canada avait accueilli l'action du plaignant totalisant 32 655,12 $ (en dollars de 1958).

5.2.3 Coulée de débris de Camp Creek, en Colombie-Britannique (82L/15–16) le 5 juin 1968

Vers 15 h 30 le 5 juin 1968, une coulée massive de débris à Camp Creek (volume évalué à environ 75 000 m^3 (Nasmith, 1972)), a englouti une voiture circulant vers l'ouest sur la route transcanadienne, à 29 km à l'ouest de Revelstoke, en Colombie-Britannique (figure 5-14). La coulée de débris a tué quatre membres d'une même famille voyageant dans l'automobile et une cinquième personne, un enfant de six ans, a été retrouvée vivante, assise sur le dessus des débris (*Vancouver Sun*, 6 juin 1968). Les débris ont coulé par-dessus le pont de Camp Creek et la route transcanadienne, à l'extrémité nord-ouest du lac Griffin, obstruant la route pendant deux jours. Les débris ont recouvert la route sur une profondeur atteignant 6 m et comportaient un énorme rocher d'un diamètre de 4 m.

Figure 5-14 Une photographie aérienne de la coulée de débris de Camp Creek montre le début d'une avalanche de débris, la surélévation de débris à la jonction du ruisseau et le sentier sinueux jusqu'à la route transcanadienne. L'emplacement de l'impact sur la route transcanadienne, à l'ouest du lac Griffin, est encerclé à gauche. (Photothèque nationale de l'air A 23011; 119-118.)



La coulée de débris a débuté sous la forme d'un glissement de débris d'une profondeur de 10 m formé de sol alluvial glaciaire, à une altitude de 1675 m sur une pente boisée escarpée, 1240 m au-dessus et 3.5 km au nord-est de la route transcanadienne. Le glissement s'est transformé en une coulée de débris mobile qui a dévalé jusqu'à Camp Creek, ramassant sur son passage de grandes quantités de débris provenant du lit de la crique. Les débris a fait paraître une surélévation impressionnante faisant une courbe à 1066 m ASL (figure 5-14). La coulée s'est déplacée rapidement (à une vitesse évaluée à environ 8 m/s) alors qu'elle était confinée à la vallée escarpée de la crique, mais s'est bien vite arrêtée lorsqu'elle s'est répandue dans l'élargissement de Camp Creek. La coulée de débris avait été précédée de fortes pluies et de température chaude, ce qui a provoqué une fonte rapide de la neige dans les cours supérieurs de Camp Creek (dossiers non publiés du Ministry of Transportation and Highways de Colombie-Britannique).

En juin 1990, à l'ouest de Camp Creek, un train à destination de l'Ouest du CN, circulant sur la voie ferrée du CP Rail près du mille 22,50 de la sous-division de Shuswap, a frappé une coulée de débris et 14 wagons ont déraillé. La ligne principale a été hors service pendant environ 21 heures. La coulée de débris a été déclenchée par une forte chute de pluie. Environ 4600 m^3 de débris ont atteint la voie ferrée.

5.2.4 Coulées de débris au mont Cathedral, vallée Kicking Horse (82N/08) le 6 septembre 1978 et le 29 août 1984

Les coulées de débris provenant du versant nord du mont Cathedral, à 6,5 km au nord-est de Field, dans la vallée Kicking Horse, ont périodiquement interrompu le trafic routier et ferroviaire traversant la vallée depuis au moins 1925 (Jackson, 1979; Jackson et al., 1989). Deux incidents majeurs se sont produits en 1978 et 1984.

1978 : Vers 21 h le 6 septembre 1978, la voie ferrée de CP Rail et la route transcanadienne ont été ensevelies par une coulée de débris à proximité de Spiral Tunnels, dans la vallée Kicking Horse. Au total, 175 000 m^3 de débris ont été déposés et la coulée a enseveli les locomotives d'un train de marchandises (Jackson, 1979) (figure 5-15). La vitesse de la vague principale a été évaluée à environ 6 m/s.

Figure 5-15 Photographie aérienne oblique de la coulée de débris de septembre 1978 au mont Cathedral montrant le train de marchandise à destination de l'Est pris dans la coulée de débris. La vue est vers l'est. Les débris ont également recouvert la route transcanadienne au coin supérieur gauche. (Photographie des archives de Glenbow CH-17A.)

Figure 5-16 Vue aérienne oblique du tracé de la coulée de débris du mont Cathedral. Les coulées de débris sont déclenchées par les apports périodiques d'eau provenant des glaciers du mont Cathedral (indiqués par une flèche). Remarquez les trois niveaux de tracés associés aux Spiral Tunnels. Regardez la figure 5-15 où la coulée de débris de 1978 est encerclée. La route transcanadienne passe de gauche à droite à l'arrière plan (photographie de S.G. Evans, septembre 1997).

1984 : Entre 8 h 30 et 10 h le 29 août 1984, les débris ont recouvert les deux voies ferrées supérieures de CP Rail et se sont déversés sur la route transcanadienne (figure 5-16). Le volume était d'une magnitude moins élevée (volume évalué à 90 000m^3) que l'incident de 1978 et la circulation du trafic a été rétablie en 28 heures environ. La vitesse maximale estimée sur le parcours de la coulée de débris était de 5,5 m/s (Jackson et al., 1989).

Les coulées de débris ont été déclenchées par le drainage soudain (débâcle glaciaire) d'au moins 10 000 m^3 et peut-être même 24 000 m^3 d'eau des glaciers Cathedral, à environ 1500 m au-dessus de la vallée (Jackson et al., 1989). Les eaux de crue comportaient des débris provenant du lit et des parois du ravin Cathedral qu'elles avaient ramassé sur leur passage vers le fond de la vallée Kicking Horse. Des coulées de débris semblables, générées par des débâcles glaciaires provenant du glacier Cathedral, ont enseveli les rails du Canadien Pacifique en 1925 et 1946.

Aucune coulée de débris ne s'est produite depuis la mise en oeuvre des mesures de réduction des débâcles glaciaires décrites par Jackson et al. (1989).

5.2.5 Avalanche de débris de la crique Belgo, dans la circonscription Joe Rich, en Colombie-Britannique (82E/14) le 12 juin 1990

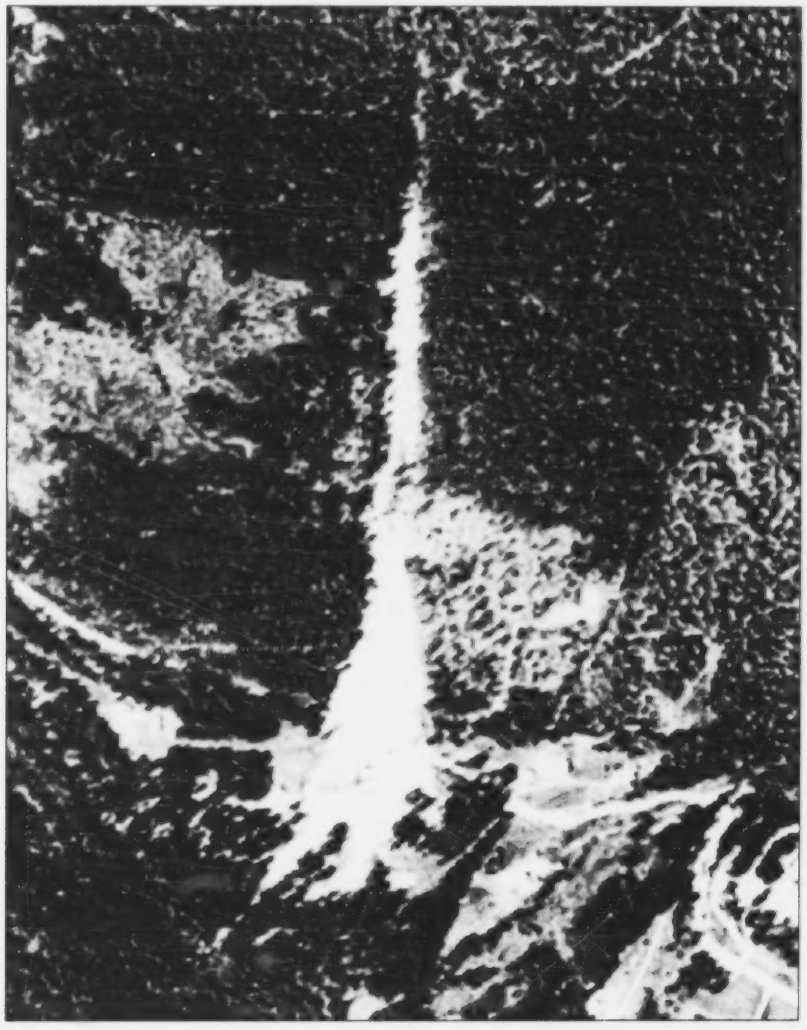
Vers 14 h 30 le 12 juin 1990, une avalanche de débris a parcouru 830 m vers le bas du côté ouest de la vallée de la crique Belgo, dans la circonscription de Joe Rich, à environ 30 km à l'est de Kelowna, en Colombie-Britannique (figure 5-17; Cass et al., 1992; *The Vancouver Sun,* 13–14 juin 1990; Hungr, 1997a). Le glissement de terrain, qui fût accompagné par un grondement intense, a démoli une maison et les dépendances sur le chemin Philpott et a enseveli deux automobiles. Trois occupants de la maison ont perdu la vie.

L'avalanche de débris à commencé sous la forme d'un petit glissement plat formé d'une mince couche de colluvions sur un substratum gneissique sur une pente de 33 degrés à 1215 m ASL (Forest Service Investigative Team, 1990; Hungr, 1997a). Les colluvions se composaient de 45 % de sable, 35 % de limon, 10 % d'argile et 10 % de matière organique. Les débris provenant du glissement initial se sont rapidement déplacés vers le bas de la pente en recouvrant un placage colluvial saturé. Une avalanche de débris s'est rapidement formée par le processus d'entraînement de colluvions saturés dans son parcours élargi et a pris rapidement du volume. Hungr (1997a) croit que la charge non drainée de la couche de surface ensevelie a joué un rôle important dans le processus d'entraînement des matières formant la pente au fur et à mesure que l'avalanche prenait de l'ampleur. La zone de dépôt était située en pente descendante du changement brusque de la pente à 925 m ASL, point auquel la largeur de l'avalanche de débris était de 150 m. La maison a été touchée dans cette zone.

La vitesse de l'avalanche, qui se comportait environ 23 000 m^3 de débris, a été évaluée à 10 m/s (Cass et al., 1992). Des estimations de la surélévation dans les segments tournants du parcours des débris indiquent une vitesse locale de 15 à 20 m/s (Hungr, 1997a).

L'incident s'est produit sur un versant n'ayant aucun antécédent de rupture de pente (figure 5-17). Cependant, trois autres glissements de terrain se sont produits au sud de la même pente le jour avant que ne se produise le glissement principal. L'exploitation forestière surplombant le site a de toute évidence contribué au glissement de terrain (*The Province,* 2 août 1990). L'avalanche a été déclenchée par des pluies intenses, combinée à la fonte rapide de la neige; les 42 jours qui ont précédé le glissement de terrain ont été les plus humides jamais enregistrés (Cass et al., 1992). De nombreuses autres coulées et avalanches de débris ont été déclenchées dans les terres intérieures de la C.-B. par les fortes pluies au cours de cette période (Cass et al., 1992).

Figure 5-17 Photographie aérienne du site de l'avalanche de débris de la crique Belgo de 1990. Photo prise le 2 août 1993 (province de la Colombie-Britannique 30BCC93061; 12).



5.2.6 Coulée de débris du mont Stephen, près de Field, en Colombie-Britannique (82N/08) le 3 août 1994

Le parcours de la coulée de débris du mont Stephen (figure 5-18), situé à 4,5 km au nord-est de Field, en Colombie-Britannique, a été sujet à des coulées de débris périodiques et des avalanches de neige qui ont touché, à plusieurs reprises dans le passé, la ligne principale de CP Rail. En juillet 1937, un train de voyageurs a évité de sérieux dommages en réussissant à devancer une coulée de débris massive (*Calgary Herald*, 29 juillet 1937) qui devait avoir un volume de 110 000 m^3 (Thurber Engineering, 1994). En 1985, une avalanche de neige, descendant le même

parcours, a frappé un train de marchandises provoquant le déraillement de 15 wagons. Le parcours de la coulée de débris a été créé au cours de ce siècle par l'érosion d'un cône de débris (figure 5-18), possiblement à la suite de la fonte d'une calotte de pergélisol à son sommet associé au réchauffement climatique régional (Thurber Engineering, 1994).

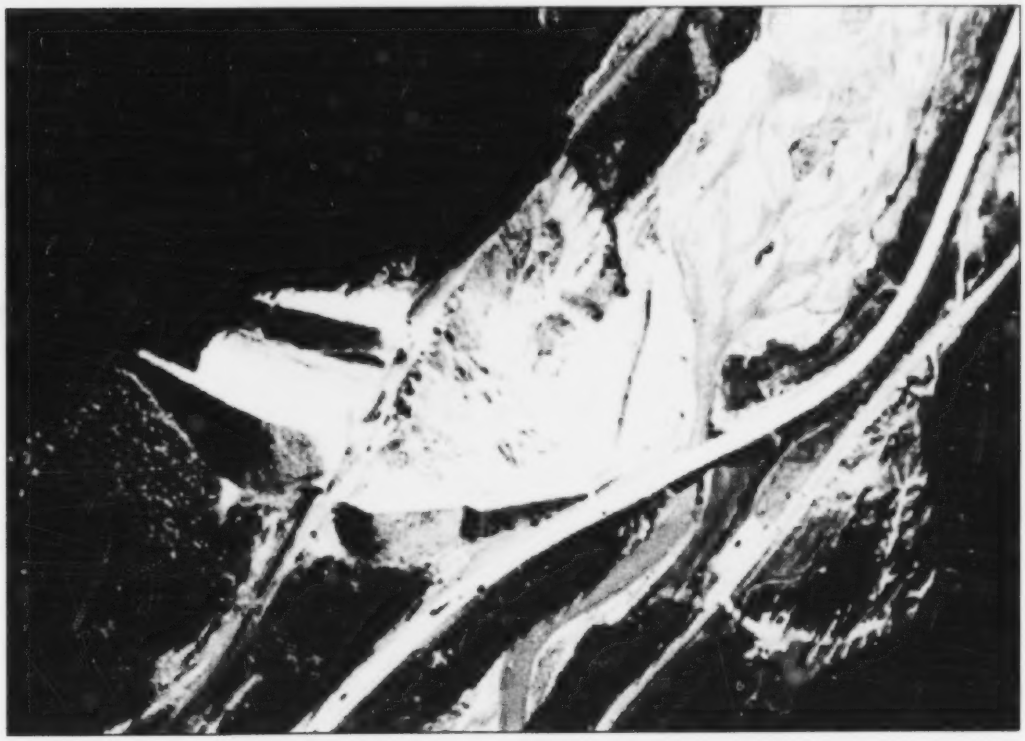
En 1987, CP Rail a construit une structure défensive, constituée d'un redan en béton et d'un mur déflecteur tournant en amont, afin de protéger la voir ferrée des coulées de débris et des avalanches de neige (figure 5-19; Hungr et al., 1987). Un mur de protection marginal a également été construit dans la zone de dépôt afin de faire dévier les débris parallèlement au remblai de la route transcanadienne (figure 5-19; *Calgary Herald*, 28 août 1994). À la fin des travaux, trois coulées de débris se sont produites en 1988, 1989 et 1994 et ont passé avec succès par-dessus la route par le redan en béton.

Figure 5-18 Vue aérienne oblique du mont Stephen (3185 m ASL.) et la piste de la coulée de débris (partiellement dans l'ombre) au-dessous du glacier en suspension. Remarquez les travaux de canalisation au-dessus de la voie ferrée du CP Rail qui passe sous le redan pour coulée/avalanche de débris (la voie ferrée est à 1330 m ASL dans le redan), la route transcanadienne et la rivière Kicking Horse (à environ 1265 m ASL) qui s'écoule à la droite. (Photographie de S. G. Evans, mai 2000.)

La coulée de débris du 3 août 1994 comportait des débris mobilisés du cône par un orage très violent tard en après-midi. La coulée de débris avait un volume évalué à 42 000 m^3 et se divisait en deux langues après être passée par le redan, dont l'une s'est écoulée le long du remblai de la route transcanadienne, au-delà de l'extrémité du mur marginal et a pénétré dans la rivière Kicking Horse (Thurber Engineering, 1994). L'extrémité de cette langue de coulée a déposé plusieurs milliers de mètres cubes dans le canal de la rivière, bloquant le canal et provoquant une avulsion en amont. Cela a causé l'inondation et l'érosion partielle de la route transcanadienne à l'ouest du pont, ce qui a forcé sa fermeture pendant environ 24 heures et une fermeture temporaire du site de camping du parc national (*Vancouver Sun*, 5 août 1994).

À l'automne de 1994, un mur terminal d'une hauteur de 4,5 m a été érigé dans la zone de dépôt, sous la voie ferrée, afin de réduire les conséquences futures des coulées de débris sur la rivière Kicking Horse (figure 5-19).

Figure 5-19 Vue aérienne oblique des structures de protection et de retenue de coulée et d'avalanche de débris construites dans la zone de dépôt du parcours de la coulée de débris du mont Stephen. Elles comprennent des travaux de canalisation dans la pente ascendante du chemin de fer, du redan pour coulée/avalanche de débris et du mur marginal afin de protéger la route transcanadienne. Remarquez le mur terminal construit en 1994 afin d'empêcher les coulées de débris de pénétrer dans la rivière Kicking Horse. (Photographie de S. G. Evans, septembre 1997)



5.2.7 Coulée de débris de la crique Hummingbird, au lac Mara, en Colombie-Britannique ((82L14-15) le 11 juillet 1997

Vers 19 h le 11 juillet 1997, une coulée de débris s'est produite dans la crique Hummingbird (figure 5-20), qui se déverse dans le lac Mara, à environ 7,5 km au sud de Sicamous, en Colombie-Britannique (figure 5-20; Jakob et al., 2000). Les débris ont frappé la localité de Swansea Point, située dans l'élargissement de la crique Hummingbird, provoquant des dommages importants à des maisons et des cabines.

La coulée de débris a débuté sous la forme d'une avalanche de débris (figure 5-20) d'une longueur de 560 m (distance suivant la pente) sur une pente abrupte (25E) faisant face au nord-ouest à environ 1220 m ASL juste en dessous d'une zone d'exploitation forestière active (figure 5-20). L'avalanche de débris initiale comportait un placage de colluvions qui recouvrait le substratum et un till compact. La rupture s'est produite à la base des colluvions et renfermait un volume se situant entre 20 000 et 30 000 m^3 (Jakob et al., 2000). La coulée de débris s'est produite presque à la fin d'une période de précipitations au-dessus de la moyenne entre le 5 et le 12 juillet, qui a aussi occasionné d'autres coulées de débris dans les régions avoisinantes du chaînon Hunters.

L'avalanche de débris est descendue jusqu'à la crique Hummingbird à environ 950 m ASL, a tourné vers le sud-ouest et a descendu le canal abrupt confiné de la crique sur 2,5 km sous la forme d'une coulée de débris. Elle a entraîné un volume considérable, évalué à 50 000 m^3, de matière provenant de bords du lit et du canal, avant de déboucher dans l'élargissement à environ 400 m ASL. On suppose que le volume total de la coulée de débris, quand elle a atteint le sommet de l'élargissement, atteignait 70 000 à 80 000 m^3 (Jakob et al., 2000).

Figure 5-20 Photographie aérienne du parcours de la coulée de débris de la crique Hummingbird. L'avalanche de débris d'origine est indiquée par une flèche et la zone d'impact dur l'élargissement de Swansea Pointest encerclée. Le lac Mara est visible à gauche (photographie aérienne de la Colombie-Britannique 15BCB97069 prise le 11 août 1997).

La grande majorité des débris a été déposée sur le sommet de l'élargissement ou juste au-dessus de celui-ci, mais une certaine partie a traversé la localité de Swansea Point sur les rives du lac, détruisant le pont routier sur la route 97 de la Colombie-Britannique et endommageant un certain nombre de maisons. Des rochers massifs (figure 5-21) ont été déposés dans le parcours de la coulée de débris, juste en amont des maisons sur l'élargissement. Les dépôts de coulées de débris antérieures sont mis à découvert dans l'élargissement.

Figure 5-21 Vue de la partie inférieure du parcours de la coulée de débris de 1997 montrant la destruction de la forêt longeant le bord nord de la coulée de débris. Remarquez les gros rochers transportés par la coulée de débris et la personne à titre d'échelle. (Photographie de S. G. Evans, septembre 1997.)

5.2.8 Coulées de débris à la crique Five-Mile, près de Banff, dans le parc national Banff, en Alberta, le 4 août 1999

vers 18 h 45 le mercredi 4 août 1999, une quantité substantielle d'eau, de boue, de rochers et de débris d'arbres provenant de la crique Five-Mile a recouvert les quatre voies de la route transcanadienne à environ 5 km à l'ouest de la principale sortie vers Banff, en Alberta (figure 5-22).

Le ponceau de quatre mètres de diamètre sous la route s'est rapidement rempli de rochers et de branches d'arbres et ensuite la route a été recouverte sur environ 200 m par des débris dont l'épaisseur variait entre 0,5 m et 2 m (figure 5-22; Couture & Evans, 2000a).

La coulée de débris de la crique Five-Mile a été déclenchée par une pluie très forte localisée au-dessus de la vallée et adjacente aux chaînes de montagnes. Même si deux stations météorologiques n'ont pas enregistré d'incident climatique inhabituel, telle une forte précipitation, les gardes du parc Banff ont confirmé qu'un orage violent avait sévi quelques heures avant la coulée de débris. Cependant, les données climatiques indiquent que les précipitations totales pour juillet 1999 ont été le double des précipitations mensuelles moyennes

enregistrées sur une période de 100 ans (Environnement Canada). Cela laisse à croire que les dépôts meubles sur la pente de la montagne auraient été saturés lorsque l'orage a déclenché le coulée de débris.

Les débris constituant la coulée provenaient des dépôts colluviaux (conséquence des intempéries sur les formations rocheuses à nu et des petites chutes de pierres) sur les pentes est et ouest de la vallée de la crique Five-Mile (figure 5-23). Les eaux courantes provenant de quatre grands marais (numérotés de 1 à 4 sur la figure 5-23), situés sur les pentes est du mont Cory, ont transporté la plus grande partie des débris dans la crique Five-Mile. Plus de 10 petits marais, situés sur les pentes ouest du mont Edith, ont aussi transporté des débris dans le canal principal (figure 5-23).

La coulée de débris a parcouru plus de 3 km de sa zone d'origine, soit les monts Edith et Cory, avant de descendre jusqu'à la route transcanadienne (figure 5-24). Le mélange d'eau et de débris a flotté sur la crique Five-Mile, rongeant le lit et les matières en place dans la crique et déposant des débris (levées alluviales) le long des berges de la crique. Une petite quantité de débris, essentiellement de la boue, a atteint la voie ferrée du Canadien Pacifique situé à 250 m au sud de la route (figure 5-23), mais sans causer de dommages.

Les équipes d'entretien de la route ont pris environ trois semaines à rétablir le trafic normal, nettoyer la route et réaménager les parties du lit de la crique en amont et en aval de la route. Environ 45 000 m^3 de débris ont été retirés près de la route. Des milliers d'automobilistes ont été touchés par la fermeture de la route et ont dû rebrousser chemin pour emprunter d'autres routes ou ont été forcés d'attendre que la route soit rouverte 24 heures plus tard. Les débris ont aussi coupé des fils de fibre optique enfouis, privant du même coup la communauté de lac Louise de toute communication téléphonique. Le chenal de la crique Five-Mile n'est pas considéré comme un secteur problématique en termes de coulées de débris destructrices. Aucune coulée de débris importante ne s'est produite au cours des 50 dernières années. Heureusement, la coulée de débris de la crique Five-Mile s'est produite à un moment de la journée et de la semaine où la circulation n'est pas dense.

D'autres coulées de débris se sont récemment produites dans le sud des montagnes Rocheuses, dans la région de la vallée Banff-Bow. Par exemple, en juillet 1998, deux coulées de débris, au moins aussi importantes que celle de l'incident de la crique Five-Mile, se sont produites dans la vallée Spray River (Couture et Evans, 2000a). Les coulées de débris ont temporairement obstrué la Spray River et un petit lac a été endigué, restreignant l'accès à une cabine de gardien. Une très forte pluie a de nouveau servi de déclencheur à ces coulées de débris.

Figure 5-22 Photographie aérienne oblique des débris recouvrant la route transcanadienne à environ 5 km à l'ouest de la ville de Banff, en Alberta (photographie fournie par le parc national Banff, août 1999).

Figure 5-23 Photographie aérienne du bassin hydrologique de la crique Five-Mile (ligne pointillée). Les flèches indiquent les principaux marais qui sont à la source des débris dans la crique Five-Mile. (Photographie aérienne de Foto Flight FF99043 L2, n° 6-10, de Couture et Evans, 2000a.)

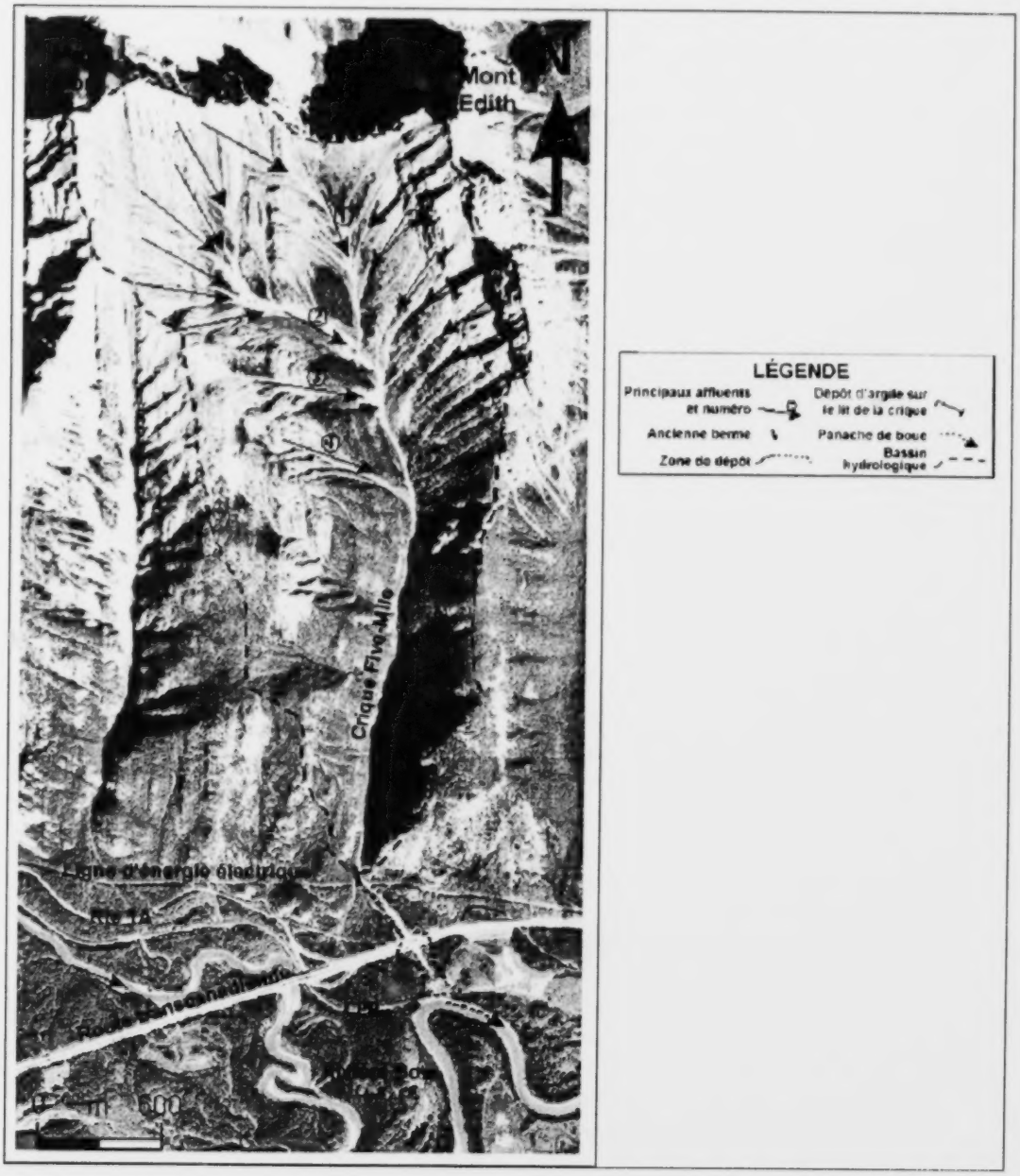
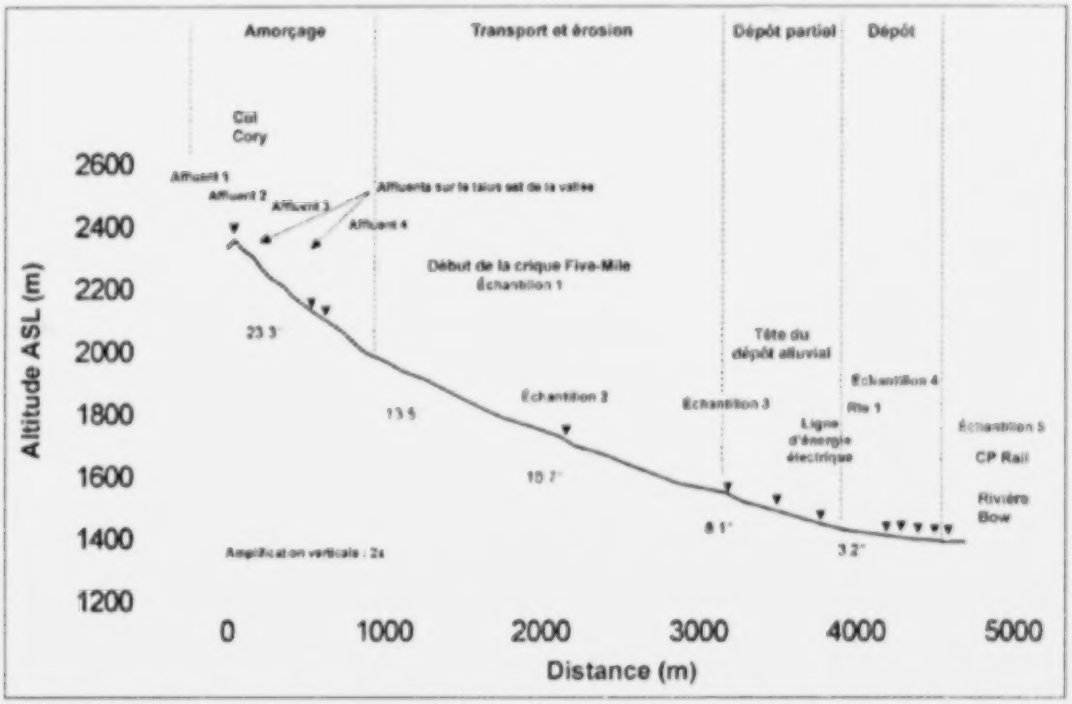


Figure 5-23 Photographie aérienne du bassin hydrologique de la crique Five-Mile (ligne pointillée). Les flèches indiquent les principaux marais qui sont à la source des débris dans la crique Five-Mile. (Photographie aérienne de Foto Flight FF9904 3 L2, n° 6-10, de Couture et Evans, 2000a.)

Figure 5-24 Profil de la vallée de la crique Five-Mile du col Cory à la rivière Bow. Les cercles indiquent des changements dans le profil topographique associés aux changements des unités géologiques. (De Evans et Couture, 2000a)



5.3 Glissements dans les terrils de charbon

5.3.1 Glissement de déchets de la mine de charbon, à Sparwood, en Colombie-Britannique (82G/10) le 24 novembre 1968

Un glissement de déchets de mine de charbon s'est produit près de Sparwood, dans le sud des montagnes Rocheuses en Colombie-Britannique (figure 5-25) vers 11 h 45 le 24 novembre 1968. Environ 150 000 m^3 de débris (Broughton, 1992) ont soudainement glissé du terril de déchets de roches, comportant du grès, de la siltite et du mudstone, sur une pente surplombant la vallée de la crique Michel, à l'extrémité nord du chaînon Sparwood (figure 5-25). La hauteur verticale du parcours du glissement était d'environ 300 m. Les débris ont déferlé sur la pente descendante jusqu'au fond de la vallée où ils ont recouvert environ 375 m de la Route 3 de la Colombie-Britannique jusqu'à une profondeur maximale de 10 m (figure 5-25). Deux automobilistes ont été tués par le glissement de terrain lorsque leur automobile a été engloutie dans les débris. Un entrepreneur avait apparemment inspecté le terril trois semaines avant la rupture et avait indiqué qu'il était sécuritaire (*Vancouver Sun,* 25 novembre 1968).

La cause probable du glissement était une rupture au pied du terril, sur une fondation en pente formée d'un sol porteur naturel friable, incluant du silt argileux glacio-lacustre (Broughton, 1992). Une pluie abondante s'est abattue sur la région pendant la semaine précédant la rupture et

une bordée de neige était retenue dans le terril pendant la construction l'hiver précédent. Un suintement a été constaté dans le sol de support du terril après la rupture et peut avoir été un facteur important de la rupture. La stabilité du terril a été aussi compromise par le fait qu'il était situé sur un petit ruisseau dans une région où s'étaient déjà produits des mouvements de masse.

Au cours du litige qui s'ensuivit, le juge T.R. Berger a tenu la compagnie de charbon et son entrepreneur responsable du terril coupable de négligence en « créant un vaste... terril qu'ils savaient dangereux ou auraient dû savoir qu'il l'était ». (*Vancouver Province,* le 12 septembre 1972).

Figure 5-25 La vue aérienne oblique au SSE du glissement de déchets de la mine de charbon de Sparwood (province de la Colombie-Britannique (O) – 599; la phtographie a été prise le 25 novembre 1968). On constate que les débris recouvrent la Route n° 3 de C.-B. Le pont de CP Rail qui traverse la crique Michel est visible à l'avant plan.

5.3.2 Glissements gigantesques de déchets de la mine de charbon à la crique Kilmarnock, en Colombie-Britannique (82J/02) le 26 octobre 1989 et le 31 mai 1993

Les pointes gigantesques de déchets de la mine de charbon ont été érigées à la mine à ciel ouvert de la rivière Fording, à 20 km au nord de Elkford, en Colombie-Britannique. Les terrils sont empilés par des camions à benne énorme à vidage par l'arrière dans la vallée de la crique Kilmarnock; les terrils sont constitués de débris de siltite, de mudstone et de grès (Broughton, 1992; figure 5-26). D'importantes ruptures de la pente se sont produites, de temps à autre, dans ces types de pentes de pointe (p. ex., Hungr et Kent, 1995); les mouvements de pente précédant les ruptures sont surveillés à l'aide d'extensomètres à câble qui permettent de prévoir les ruptures (p. ex., Campbell et Kent, 1995). Deux ruptures catastrophiques importantes ont été documentées sur les pentes du terril sud depuis le début de 1987.

Le 26 octobre 1989, vers 6 h, une rupture majeure s'est produite sur le terril de déblais sud d'une hauteur de 420 m (Broughton, 1992; Dawson et al., 1994; Golder Associates, 1995). En 1989, la plate-forme de déversement était à environ 35 m au-dessus de la crique Kilmarnock, à 2200 m ASL. Les extensomètres à câble avaient enregistré des mouvements de 100 à 130 cm/h le jour avant que ne se produise la rupture catastrophique. La rupture avait une largeur d'environ 230 m et comprenait environ 3,9 M m^3 de déchets de roches qui se sont écoulés sur 800 m dans la pente descendante de la vallée, obstruant la crique Kilmarnock pendant presque six jours (*Vancouver Province*, octobre 1989).

On suppose que la rupture s'est produite dans la zone de contact entre le terril et la surface su sol existant. Le front des débris a remonté la pente opposée sur une hauteur de 40 m au-dessus de la crique. La rupture a été extrêmement rapide. Des évaluations sur le terrain de la vitesse du glissement de terrain laissent supposer que le glissement a atteint une vitesse dépassant 28 m/s (Broughton, 1992); le feuillage à proximité immédiate a été endommagé par le jet d'air (Dawson et al., 1994). Une analyse subséquente à la rupture a indiqué que le front des débris avait atteint une vitesse de pointe de 40 m/s (Golder Associates, 1995).

Le 31 mai 1993, une rupture semblable mais plus importante s'est produite au terril sud (Golder Associates, 1995). Lors de cet incident, la plate-forme de déversement était à 2110 m ASL et le terril avait une hauteur de 385 m. Le glissement avait une largeur de 500 m et le glissement par liquéfaction avait un volume d'environ 8 M m^3 (Golder Associates, 1995). Les débris ont de nouveau remonté la pente opposée et, suite au glissement, certains débris ont glissé vers le bas de la vallée.

Figure 5-26 Vue aérienne oblique des terrils de la crique Kilmarnock en août 1995. La vue est vers l'ouest (photographie de S.G. Evans).

5.4 Coulées silteuses et chutes de silt dans du silt glacio-lacustre

5.4.1 Chutes de terre à Summerland, dans la vallée de l'Okanagan, en Colombie-Britannique (82E/12) le 27 septembre 1970 et le 15 septembre 1992

Deux chutes de terre destructrices se sont produites le long de Lakeshore Drive, dans la municipalité de Summerland, du côté ouest du lac Okanagan, en 1970 et 1992. Le premier incident s'est produit vers 17 h le 27 septembre 1970 (*Vancouver Sun*, 28 septembre 1970). Un bloc de silt glacio-lacustre est tombé d'une falaise silteuse presque verticale, s'est désintégré et est descendu sous forme d'une masse granulaire sèche de silt et de blocs de silt (figure 5-27). Trois maisons à la base de la falaise ont été détruites et une personne a perdu la vie. Le glissement a recouvert une distance de 60 m du Lakeshore Drive d'une couche de slit atteignant jusqu'à 4 m.

On pense que la rupture a été causée par des pressions d'eau qui se sont développées dans les joints de stabilisation de la falaise silteuse. Ces pressions résultent sont probablement de l'irrigation d'un verger sur la berme au-dessus de la falaise (Evans, 1982). Des chutes semblables et des coulées subséquentes se sont produites sur des pentes à l'extérieur des zones irriguées seulement pendant les périodes de dégel et de pluie abondante.

Une deuxième chute de terre s'est produite sur le Lakeshore Drive, vers 17 h 15 le 15 septembre 1992 (figure 5-29; *Penticton Herald*, 16–17 septembre 1992), à 600 m au sud de l'incident de 1970. Le glissement de terrain a fracassé le garage d'une maison sur le bord du lac et a recouvert une étendue de 45 m du North Lakeshore Drive d'une couche de silt atteignant jusqu'à

5 m. Personne n'a été blessé mais un certain nombre de véhicules et de bateaux, qui étaient dans le garage, ont été détruits. Les dommages ont été évalués à plusieurs dizaines de milliers de dollars. Un verger est situé sur le dessus de la berme où le glissement s'est produit.
Le dessus des falaises, dans les deux cas, est à environ 55 m au-dessus de Lakeshore Drive.

Figure 5-27 Vue aérienne, prise en 1976, de la chute de silt de Summerland de 1970 (d'après la figure 11 de Evans, 1982). La maison de la figure 5-28 est située au point A; l'origine de la chute de silt est indiquée par le point B. Remarquez le verger sur le dessus de la zone d'origine.

Figure 5-28 Maison détruite à la base des falaises de silt, à Summerland, en Colombie-Britannique. Une personne a perdu la vie lors de cette chute de silt. Remarquez les silts laminés glacio-lacustres du Pléistocène exposés sur la face de la falaise (photographie de la Commission géologique du Canada 157909 prise par S. Leaming).

5 m. Personne n'a été blessé mais un certain nombre de véhicules et de bateaux, qui étaient dans le garage, ont été détruits. Les dommages ont été évalués à plusieurs dizaines de milliers de dollars. Un verger est situé sur le dessus de la berme où le glissement s'est produit.
Le dessus des falaises, dans les deux cas, est à environ 55 m au-dessus de Lakeshore Drive.

Figure 5-27 Vue aérienne, prise en 1976, de la chute de silt de Summerland de 1970 (d'après la figure 11 de Evans, 1982). La maison de la figure 5-28 est située au point A; l'origine de la chute de silt est indiquée par le point B. Remarquez le verger sur le dessus de la zone d'origine.

Figure 5-28 Maison détruite à la base des falaises de silt, à Summerland, en Colombie-Britannique. Une personne a perdu la vie lors de cette chute de silt. Remarquez les silts laminés glacio-lacustres du Pléistocène exposés sur la face de la falaise (photographie de la Commission géologique du Canada 157909 prise par S. Leaming).

Figure 5-29 Vue aérienne du site de la chute de silt du 15 septembre 1992 à Summerland, en Colombie-Britannique. La zone d'origine de la chute de silt est indiquée par une flèche. Une maison endommagée sur North Lakeshore Drive est encerclée. Photographie prise en septembre 1997 par S. G. Evans. Remarquez la construction d'une berme protectrice à la base de la pente afin d'empêcher le glissement de chute de silt ou de coulée de silt. Le lac Okanagan est au centre droit, à l'avant-plan.

6.0 Déclencheurs de glissement de terrain et avertissement donné par le changement climatique

L'analyse de la base de données indique que de nombreux glissements de terrain destructeurs (particulièrement les coulées de débris, les avalanches de débris, les ruptures de pentes bâties et les glissement de terrain de matériaux glacio-lacustres) ont été déclenchés par la précipitation. Il peut s'agir d'une pluie abondante, d'une chute de pluie extrême ou de neige mêlée à de la pluie (p. ex., Evans et Lister, 1984; Cass et al., 1992; Evans, 1999, Jakob et al., 2000).

La réaction des pentes à une chute de pluie est complexe sur le plan local et varie selon des facteurs tels la végétation, l'utilisation du sol, la pente, l'aspect et l'humidité antérieure de la salissure. À long terme, cependant, une augmentation des précipitations devrait contribuer à faire augmenter la fréquence des glissements de terrain destructeurs. Cet effet peut être contrebalancé par l'augmentation de l'évaporation atteinte par une hausse de la température. Dans la présente section, nous examinons les faits probants de cet effet de premier ordre de changement climatique.

6.1 Dossiers sur le climat

La surveillance du climat dans le sud-est de la Cordillère se fait par intermittence depuis la fin du 19^{e} siècle. La qualité et la longévité des ensembles des données varient d'une station à l'autre; la plupart des stations sont actives depuis les années 60 et 70 et, pour certaines, les mesures sont très sporadiques, ce qui limite la profondeur de l'analyse, particulièrement lors de l'étude des variations de changement climatique là où un ensemble de données de hautes qualités, recueillies sur une longue période, est nécessaire. La pente, l'aspect et l'altitude ont une influence sur les variations de température et la répartition des précipitations.

Deux dossiers sur les températures et les précipitations à long terme ont été montés afin d'examiner les effets possibles du changement climatique sur le sud-est de la Cordillère. Les deux stations représentaient la zone alluviale et la zone montagneuse : Revelstoke et le parc national des Glaciers (GNP). Les détails en provenance des stations figurent au tableau 6-1.

Tableau 6-1 Description des stations climatiques d'Environnement utilisés à la section 6.0.

	Revelstoke		Parc national des Glaciers		
Nom de la station	**Aéroport de Revelstoke**	**Revelstoke**	**Glacier**	**Avalanche de glacier RS**	**Col Rogers du parc national des Glaciers**
ID de la station	1176751	1176750	1173180	1173190	1173191
Années d'exploitation	1969–1999	1898–1969	1892–1957	1957–1965	1965–2000
Latitude	50° 57'	51° 00'	51° 14'	51° 16'	51° 18'
Longitude	118° 10'	118° 12'	117° 29'	117° 30'	117° 31'
Altitude (m)	450	456	1248	1177	1323

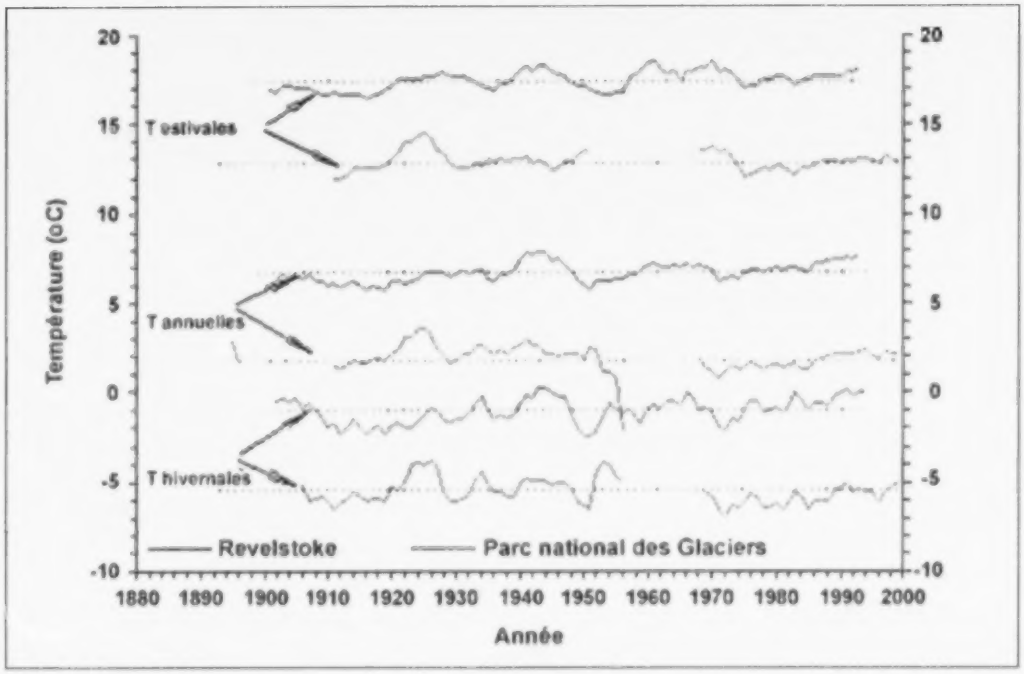
6.2 Température

In a signalé qu'au cours du 20^{e} siècle, la température dans le sud-est de la Cordillère a augmenté de 0,6°C (volume 1 de Taylor et Taylor, 1997). Des températures minimales quotidiennes plus chaudes pendant l'hiver ont contribué à cette augmentation statistique marquée (Hengeveld, 1997).

Les températures mensuelles pour Revelstoke sont un ensemble de données homogènes tirées de la base de données climatologiques canadiennes historique d'Environnement Canada (http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/hccd/). Ces valeurs ont, pour la plupart, été obtenues de la station climatique de Revelstoke (1176751) d'Environnement Canada. Des valeurs de stations hautement corrélées, qui ont été soumises à une analyse de régression, ont été ajoutées au dossier. Le processus a permis d'obtenir un ensemble de données s'échelonnant de 1898 à 1995.

Aucun dossier à long terme, représentatif du parc national des Glaciers, n'est encore disponible dans la base de données historiques. Le dossier présenté ici n'est pas tellement bon puisqu'il a été constitué à partir de deux stations qui ne se chevauchaient pas et a empêché qu'une analyse de régression plus précise soit faite. La station des Glaciers (1173180) a été exploitée de 1897 à 1957 et quelques mois et années y manquent. Le col Rogers du parc national des Glaciers (1176751) ajoute à cet ensemble de données des valeurs mensuelles de 1965 à 2000. Le dossier ne comporte pas de valeurs de 1957 à 1965 parce que les stations n'ont pas couvert cette période (tableau 6-1).

Figure 6-1 Températures annuelles, estivales et hivernales à Revelstoke et au parc national des Glaciers. Les lignes pleines correspondent à la moyenne chevauchante sur cinq ans et les lignes pointillées correspondent à la moyenne.



Tel que l'illustre la figure 6-1, les températures à Revelstoke sont d'environ 5 °C plus chaudes que celles du GNP, quelle que soit la saison. Les températures sont plus variables au GNP; les extrêmes sont habituellement plus bas et plus hauts que ceux de Revelstoke. Cependant, les tendances sont semblables (la valeur « R » est environ 0,7) et sont donc représentatives du climat régional.

Les diagrammes de températures sont cycliques. Les périodes plus chaudes sont suivies de périodes plus froides et vice versa. Les températures baissent en début du dossier pour atteindre un seuil aux alentours de 1920. Elles augmentent ensuite de façon plus ou moins continue pendant 30 ans. De très basses températures ont été enregistrées au début des années 50. Le dossier semble indiquer des températures à la hausse au cours des 15 années suivantes. Cependant, à cette époque, des points de données clés manquent dans le dossier du GNP, empêchant d'obtenir des observations et une analyse régionale des plus précises. Les faibles valeurs obtenues au début des années 70 brisent ce diagramme. Il y a eu, depuis, une tendance au réchauffement. Cette observation essentielle concorde avec les constatations publiées dans *L'étude pan-canadienne* (Taylor et Taylor, 1997).

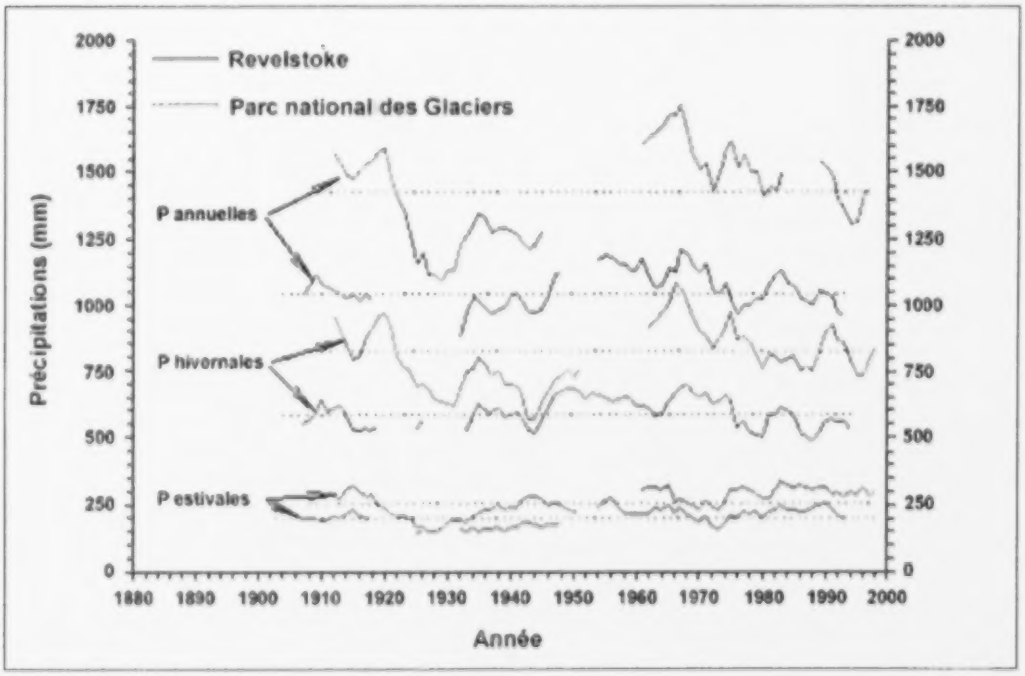
Certaines observations peuvent être faites lorsqu'on se penche sur les courbes de températures hivernales et estivales des stations. La tendance au réchauffement des 30 dernières années est quelque peu différente entre les stations. Celle de Revelstoke est légèrement plus prononcée avec

une courbe d'environ +0,07 pour la température annuelle, comparée à celle de + 0,04 pour le GNP. Cette courbe indique un réchauffement légèrement plus rapide pour Revelstoke. Les températures hivernales ont aussi une courbe plus prononcée que les températures estivales. Les courbes estivales et hivernales pour Revelstoke sont de + 0,05 et + 0,09 respectivement. Pour le GNP, la courbe estivale est de +0,04 et la courbe hivernale est de + 0,06. Ces observations indiquent de plus grandes conséquences des variations climatiques sur les conditions hivernales. Elles sont, cependant, plus variables d'année en année que les températures estivales et, par conséquent, plus difficiles à évaluer.

6.3 Précipitation

Les dossiers sur les précipitations de Revelstoke et du GNP sont illustrés à la figure 6-2. Les deux dossiers ont été constitués à partir de la base de données historiques d'Environnement Canada et représentent des valeurs homogénéisées. Certaines valeurs manquent dans les deux ensembles de données. On peut expliquer ces omissions par la nature discontinue des précipitations et la difficulté à trouver des stations hautement corrélées. Néanmoins, les valeurs en provenance des stations de Revelstoke (1176751) et du col Rogers du parc national des Glaciers (1173191) (voir le tableau 6-1) sont indiquées ici. Les valeurs des précipitations sont en millimètres; les précipitation hivernales sont exprimées en millimètres d'équivalence en eau.

Figure 6-2 Précipitations annuelles, estivales et hivernales à Revelstoke et au parc national des Glaciers. Les lignes pleines correspondent à la moyenne chevauchante sur cinq ans et les lignes pointillées correspondent à la moyenne.



Les précipitations hivernales sont beaucoup supérieures aux précipitations estivales, avec des moyennes respectives de 590 mm et 830 mm à Revelstoke et au GNP, en comparaison aux moyennes de précipitations estivales de 200 mm à Revelstoke et de 260 mm au GNP.

Les précipitations ont été très élevées aux deux endroits en 1918–1919. Après ces années humides, il y a eu une baisse prononcée des précipitations qui a atteint des niveaux records les plus bas vers 1930. Les précipitations ont légèrement augmenté mais sont demeurées sous, ou un peu au-dessus de la moyenne jusqu'à la fin des années 40. Des précipitations hivernales et estivales supérieures à la moyenne ont suivi ces faibles précipitations. Les précipitations hivernales diminuent depuis le début des années 70 et les précipitations estivales augmentent.

Il est intéressant de constater comment les diagrammes de précipitations hivernales et estivales ont été identiques au cours des 70 premières années figurant au dossier. Les tendances des 30 dernières sont très différentes. Les précipitations hivernales diminuent alors que les précipitations estivales augmentent. L'augmentation des précipitations estivales peut s'expliquer par la plus grande évaporation causée par des températures plus chaudes (voir la figure 6-1). Étant donné que les températures hivernales dans cette région sont habituellement en-dessous de 0 °C, les taux d'évaporation sont très faibles. Les températures plus élevées de la deuxième moitié du 20^{e} siècle n'auraient aucune incidence sur les précipitations hivernales. Le type de précipitations hivernales peut cependant être influencé par des températures plus élevées. Un hiver plus chaud peut générer plus de pluie que de neige si les températures ne sont pas suffisamment basses pour permettre la solidification. Cependant, puisque les températures hivernales sont toujours basses dans cette région, les précipitations tombent généralement sous forme de neige. Les variations climatiques n'auraient probablement pas d'incidence sur les précipitations hivernales; la tendance à un climat plus sec peut s'expliquer par la nature cyclique des précipitations.

Les études sur les changements climatiques traitant des précipitations se penchent souvent sur l'ampleur et la fréquence des incidents extrêmes. On en est venu à l'hypothèse que ces indicateurs ont augmenté et qu'ils continueront d'augmenter dans le cadre d'un scénario faisant état d'une double concentration de CO_2 (Kovacs, communication personnelle, 2001). Cela est particulièrement pertinent dans les études sur les glissements de terrain en raison de leur vulnérabilité aux précipitations.

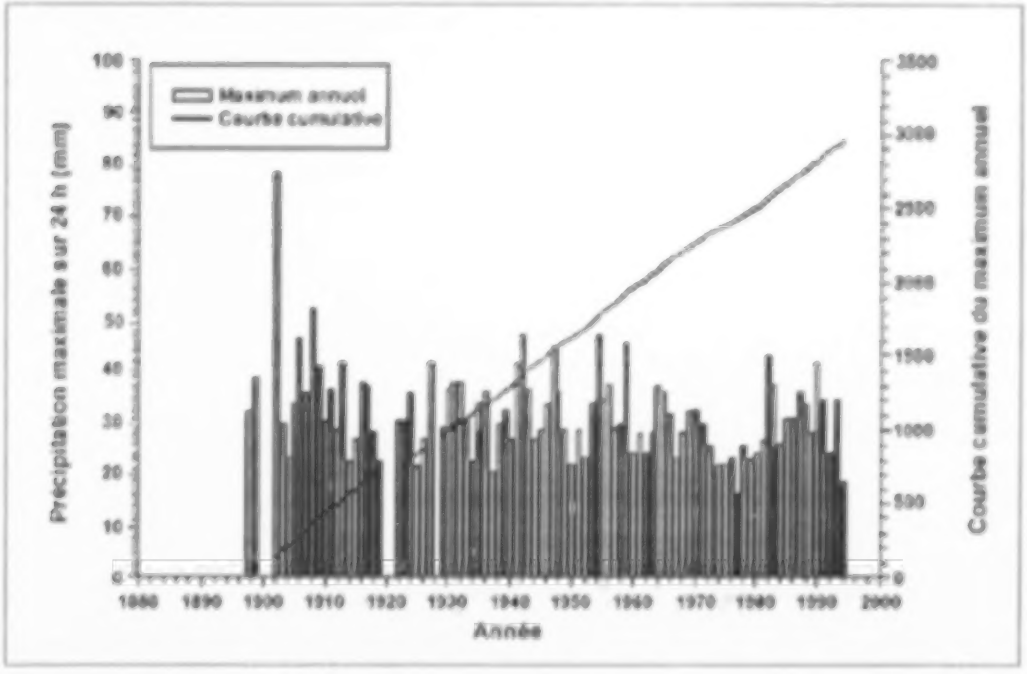
6.4 Analyse d'incidents extrêmes – Précipitation maximale en 24 heures

Les dossiers sur les précipitations ont été constitués à partir de deux ensembles de données en provenance de Revelstoke et de trois du parc national des Glaciers. Ces stations sont décrites au tableau 6-1. Le dossier de Revelstoke correspond aux stations 1176750 et 1176751 et celui du GNP, aux stations 1173180, 1173190 et 1173191. Aucune année ne se chevauche, ce qui a empêché d'obtenir une analyse assurément plus précise fondée sur la modélisation de régression. Quelques années et certains mois sont absents de l'ensemble de données, ce qui explique la courbe cumulative discontinue. Les années ayant moins de six mois de données ont été enlevées du dossier. L'analyse des données devrait être faite avec une certaine réserve.

Environnement Canada nous a fourni les valeurs des plus importantes précipitations pendant une période de 24 heures (pluie ou neige en millimètres d'équivalent en eau). Les valeurs des précipitations les plus fortes ont été enregistrées pour chaque mois de toute année disponible.

Importance – Afin d'être en mesure de déterminer si l'importance des incidents avait changée au cours du dernier siècle, les incidents ayant les précipitations les plus fortes sur 24 heures de chaque année ont été représentés sur graphique. Les figures 6-3 et 6-4 montrent les incidents mensuels avec des chutes de pluie maximale sur 24 heures au cours des 100 dernières années pour Revelstoke et le parc national des Glaciers respectivement.

Figure 6-3 Valeurs maximales annuelles des chutes de pluie sur 24 heures pour Revelstoke.

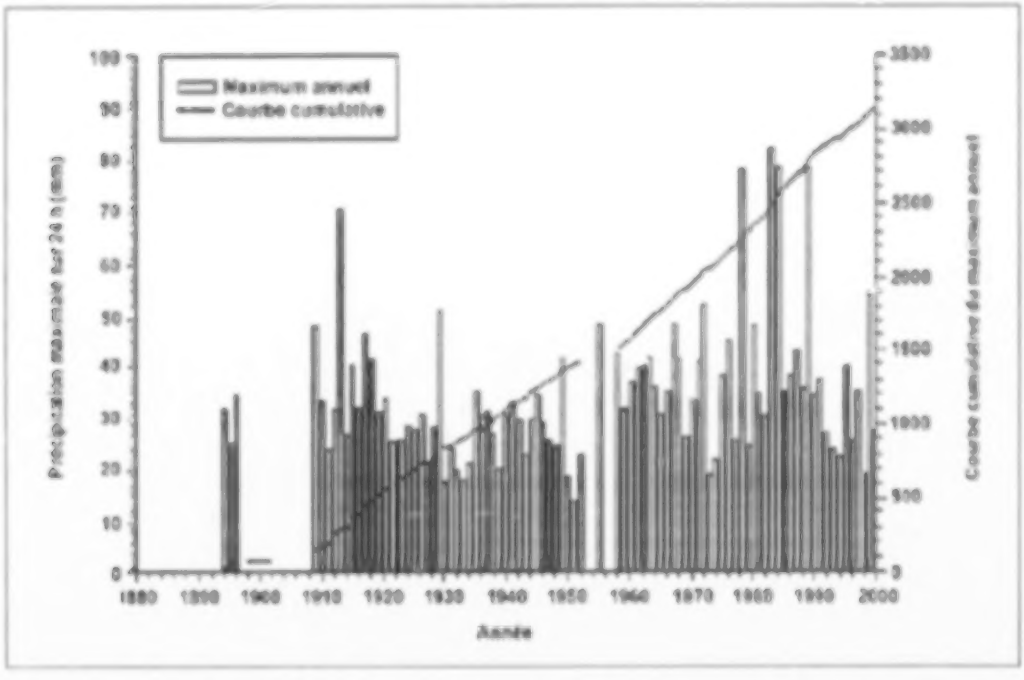


Il n'y a aucune tendance claire dans le dossier de Revelstoke (figure 6-3). La courbe cumulative est uniforme dans tout le dossier. Les périodes ayant des valeurs maximales élevées sont suivies de périodes dont les valeurs sont plus basses. Les deux plus importants incidents se sont produits au cours des 10 premières années de la tenue du dossier. Au cours des 20 premières années, les valeurs sont plus élevées. La courbe se stabilise ensuite jusqu'au début des années 60. L'importance des précipitations a diminué au cours des événements des années 60 jusqu'à la fin des années 70 et le début des années 80. Les incidents ayant des valeurs maximales ont par la suite des valeurs moyennes.

Le dossier du parc national des Glaciers comporte des valeurs plus variables et fournit plus de renseignements (figure 6-4); le cumulatif n'est pas uniforme comme il l'était pour Revelstoke. L'importance des incidents, dans ce cas-ci, est considérablement élevée au cours des 20

premières années du dossier. Les valeurs maximales baissent ensuite jusque vers 1950. Après cette période et jusqu'au début des années 70, les valeurs sont habituellement plus élevées. À partir du milieu des années 70 et jusqu'au début des années 90, les valeurs sont extrêmement élevées : quatre des plus importantes chutes de pluie inscrites au dossier se sont produites au cours des 25 dernières années.

Figure 6-4 Valeurs maximales annuelles des chutes de pluie sur 24 heures pour Revelstoke.



Les incidents ayant des valeurs maximales à Revelstoke se sont surtout produites en automne (septembre et octobre inclusivement). Des 13 incidents qui ont dépassé 40 mm au cours de tout le siècle, huit se sont produits à l'automne. La répartition des incidents est différente au GNP. Ils se sont produits durant toute l'année, sauf au printemps. Un total de 22 incidents comportant des précipitations de plus de 40 mm ont été répertoriés. Huit se sont produits à l'automne (septembre et octobre inclusivement), six pendant l'hiver (novembre à mars inclusivement), un au printemps (avril et mai inclusivement) et sept pendant l'été (juillet et août inclusivement).

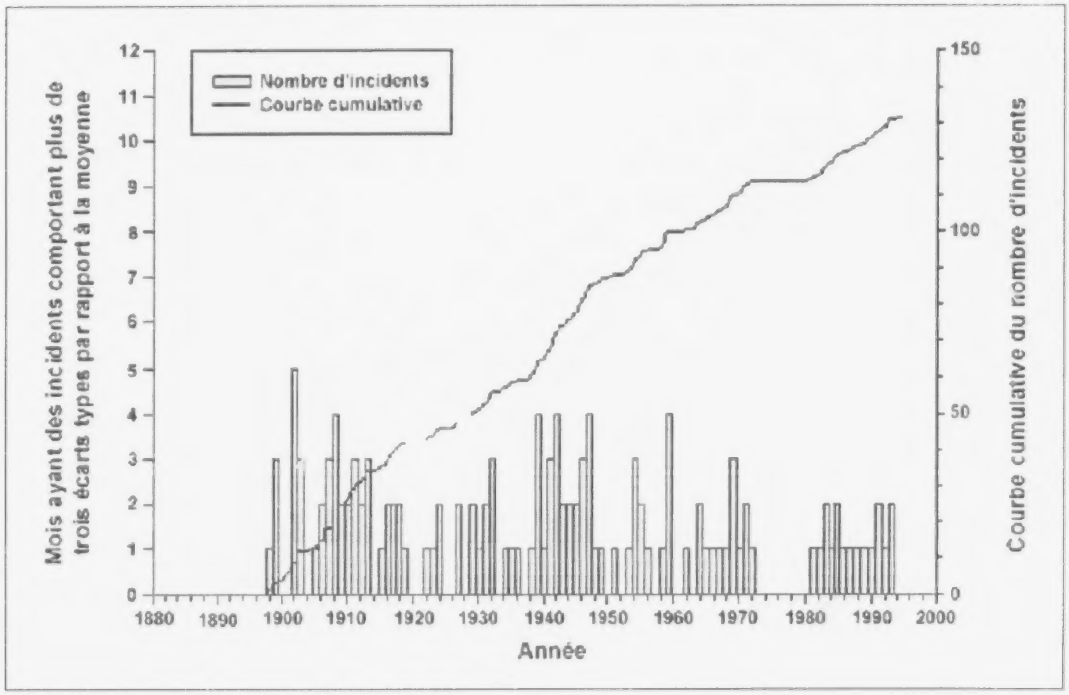
Fréquence – Pour déterminer si la fréquence des incidents extrêmes a récemment augmenté, on a créé une base de données fondée sur le nombre d'incidents annuels qui comportent trois écarts types par rapport à la moyenne. L'ensemble initial des données est le même que celui utilisé ci-dessus (c.-à-d. les précipitations maximales sur 24 heures par mois). Afin d'éviter l'utilisation de données biaisées, les écarts types ont été recueillis par mois (tableau 6-2). Des dossiers des incidents comportant plus de trois écarts types (« incidents extrêmes »), par rapport à la moyenne de chutes de pluie maximales mensuelles sur 24 heures, ont été montés pour les deux régions et sont montrés aux figures 6-5 et 6-6.

À partir du début de la prise des mesures jusque vers 1913, la fréquence des incidents extrêmes à Revelstoke est élevée (figure 6-5). Les incidents extrêmes de 24 heures se sont produits au moins au cours du tiers des mois d'une année. La fréquence des incidents extrêmes a été élevée de 1940 à 1949. La décennie suivante présentait aussi une fréquence élevée, au cours de laquelle trois ou quatre incidents extrêmes avaient été enregistrés pendant deux années. La fréquence des incidents extrêmes a diminuée depuis lors. Les incidents à Revelstoke ont été exceptionnels. Seulement un ou deux incidents extrêmes par année se sont produits.

Tableau 6-2 Écarts types mensuels pour les ensembles de données de Revelstoke et du parc national des Glaciers.

	Ensemble de données de Revelstoke	Ensemble de données du GNP
Janvier	8.4	7.3
Février	9.0	6.1
Mars	8.4	7.3
Avril	8.0	7.0
Mai	8.5	8.9
Juin	10.7	10.8
Juillet	11.1	12.5
Août	10.8	11.7
Septembre	11.6	12.8
Octobre	13.2	12.8
Novembre	10.4	12.5
Décembre	9.9	6.4

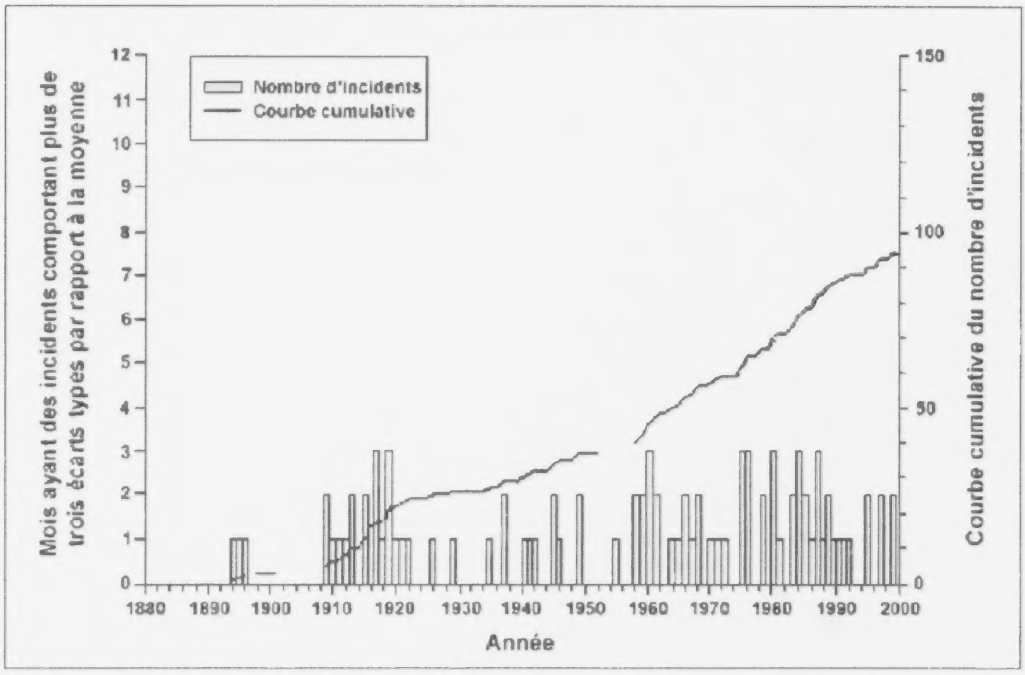
Figure 6-5 Mois ayant des incidents comportant plus de trois écarts types par rapport à la moyenne mensuelle à Revelstoke.



Les données du GNP manquent pour le début du 20^{e} siècle. La comparaison avec Revelstoke est pas donc impossible à ce moment. Il est toutefois évident que les incidents extrêmes sont moins communs au GNP qu'à Revelstoke. Le nombre maximal de mois par année ayant des incidents extrêmes au GNP est de trois. Comparez ce chiffre à celui de Revelstoke, où trois incidents par année se sont produits à trois reprises.

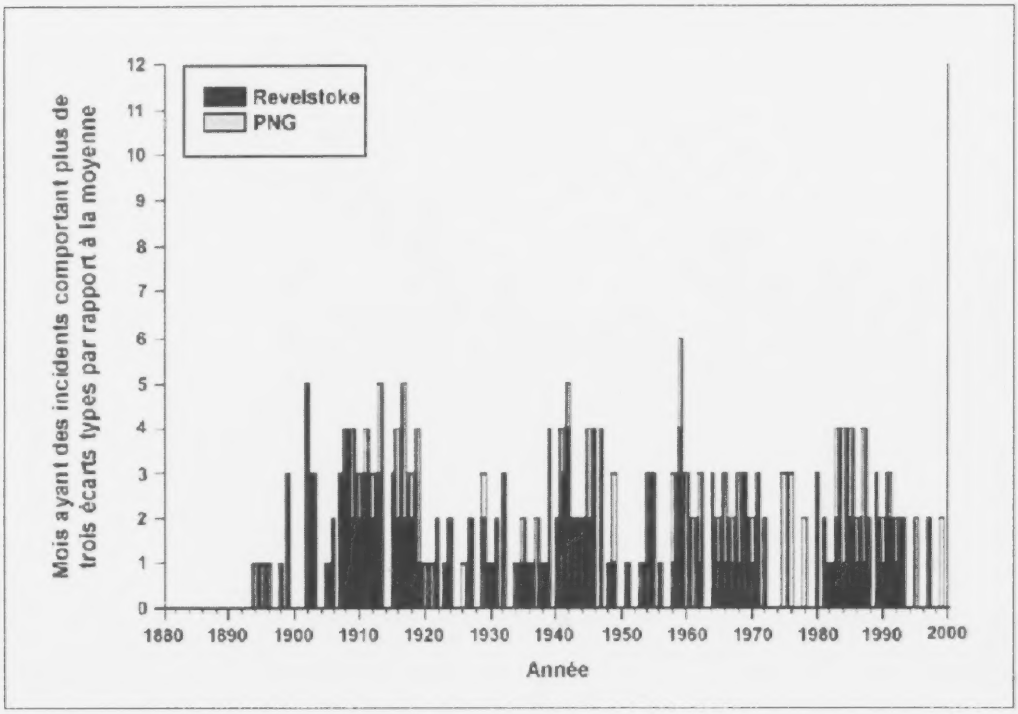
La figure 6-6 montre que le nombre d'incidents est élevé du début de la tenue du dossier jusqu'à 1920. Une faible valeur à long terme s'est ensuite établie jusqu'à la fin des années 50, au moment où la fréquence d'incidents extrêmes a augmenté. Le nombre d'incidents extrêmes sur 24 heures a été élevée depuis cette période. Trois incidents par année se sont produits à intervalles réguliers et ces années à haute fréquence d'incidents ont essentiellement alterné avec des années au cours desquelles deux incidents extrêmes se sont produits.

Figure 6-6 Mois avec des incidents comportant plus de trois écarts types par rapport à la moyenne mensuelle au parc national des Glaciers.



Il est difficile d'évaluer les changements des tendances de précipitations puisque les précipitations sont très localisées et discontinues. Revelstoke et le GNP, qui sont à 55 km l'un de l'autre, illustrent bien cette difficulté. La figure 6-7 montre le nombre d'incidents extrêmes par années des deux stations. Dans le cas présent, il est évident ici qu'on ne peut tirer aucune conclusion quant au synchronisme de ces incidents. Les deux dossiers présentent des groupements distincts.

Figure 6-7 Comparaison du nombre de mois comportant des incidents extrêmes pour Revelstoke et le parc national des Glaciers.



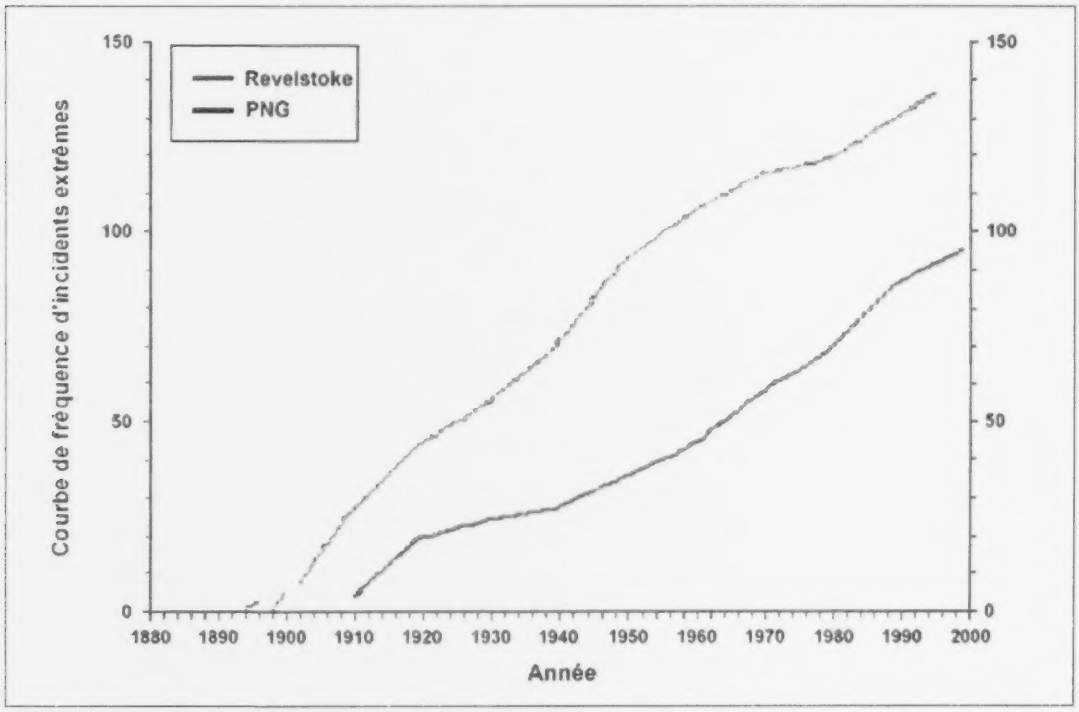
Les données répertoriées sur ces stations diffèrent considérablement pour les 40 dernières années. Revelstoke a des valeurs maximales faibles ou moyennes, alors que le GNP présentent les valeurs maximales les plus élevées répertoriées pendant cette même période. Le nombre d'incidents extrêmes par année a aussi été élevé au GNP comparativement à Revelstoke, où la fréquence des incidents extrêmes a été plus faible que par le passé.

Des mesures de la courbe décadaire ont été faites et sont présentées à la figure 6-8. Il est possible de faire des comparaisons entre les valeurs de la courbe d'une même ensemble de données. Cependant, puisque la fréquence des incidents extrêmes est plus élevée que la moyenne à Revelstoke, il est impossible de comparer les deux dossiers.

La courbe des incidents de Revelstoke est élevée jusqu'à 1920 (de 1900 à 1909, la courbe est de + 2,5; de 1910 à 1919, la courbe est de + 1,8), année où elle baisse pendant 20 ans (de 1920 à 1929, la courbe est de + 1,14; de 1930 à 1939, la courbe est de + 1,4). La courbe est ensuite extrêmement élevée (+ 2,3) pendant 10 ans, jusqu'à ce qu'elle baisse de nouveau à + 1,3 et + 1,0 pour les deux décennies suivantes. De 1970 à 1979, la courbe est à sa plus faible valeur, à + 0,4. Des augmentations de la fréquence des incidents ont été constatées avec des courbes de + 1,1 et de + 1,2 au cours des 20 années suivantes.

Au GNP, la courbe est relativement prononcée, avec une moyenne de + 1,6 de 1910 à 1919. Elle a ensuite énormément baissé jusqu'à 1960. Entre 1920 et 1959, les courbes sont égales à + 0,5 et + 0,3 de 1920 à 1929 et de 1930 à 1939 respectivement. De 1940 à 1959, la courbe est égale à + 0,8. Les trois décennies suivantes ont des valeurs-courbes prononcées, avec des moyennes respectives de + 1,4, + 1,1 et + 1,8. La courbe devient moins prononcée par la suite, avec une moyenne de + 0,9.

Figure 6-8 Moyennes des courbes par décennie



Afin de déterminer quels paramètres ont le plus affecté l'importance et la fréquence des incidents extrêmes de chute de pluie de 24 heures, des corrélations ont été établies entre l'importance et la fréquence et les températures et précipitations annuelles à Revelstoke et au parc national des Glaciers (voir les figures 6-1 et 6-2). Les résultats (valeurs « R ») sont présentés aux tableaux 6-3 et 6-4.

Tableau 6-3 Corrélation de la magnitude et de la fréquence des incidents comportant des précipitations élevées et le climat annuel à Revelstoke.

	Température	**Précipitation**
Importance de la précipitation	- 0,023	0,911
Fréquence des précipitations	0,401	0,711

Tableau 6-4 Corrélation de la magnitude et de la fréquence des incidents comportant des précipitations élevées et le climat annuel au parc national des Glaciers.

	Température	**Précipitation**
Importance	0,241	- 0,286
Fréquence	0,142	- 0,023

Les résultats des corrélations sont considérablement meilleurs à Revelstoke. Alors que les températures de Revelstoke peuvent avoir un effet sur la fréquence des incidents extrêmes, les plus hautes corrélations se situent au niveau des précipitations annuelles. Les années humides sont associées à des incidents fréquents et de grande importance.

Au GNP, il n'y a aucune relation entre l'importance et la fréquence des incidents extrêmes tant au niveau des températures que des précipitations. Les incidents extrêmes pourraient donc être reliés aux précipitations à court terme qui seraient probablement causées par des anomalies de précipitations à micro-échelle. Cette observation coïncide avec la nature irrégulière du climat du GNP. La topographie variée de la région du GNP jumelée à la pente altitudinale élevée ont favorisé la formation de son propre microclimat.

7.0 Élaboration d'un modèle de risques de glissements de terrain régionaux

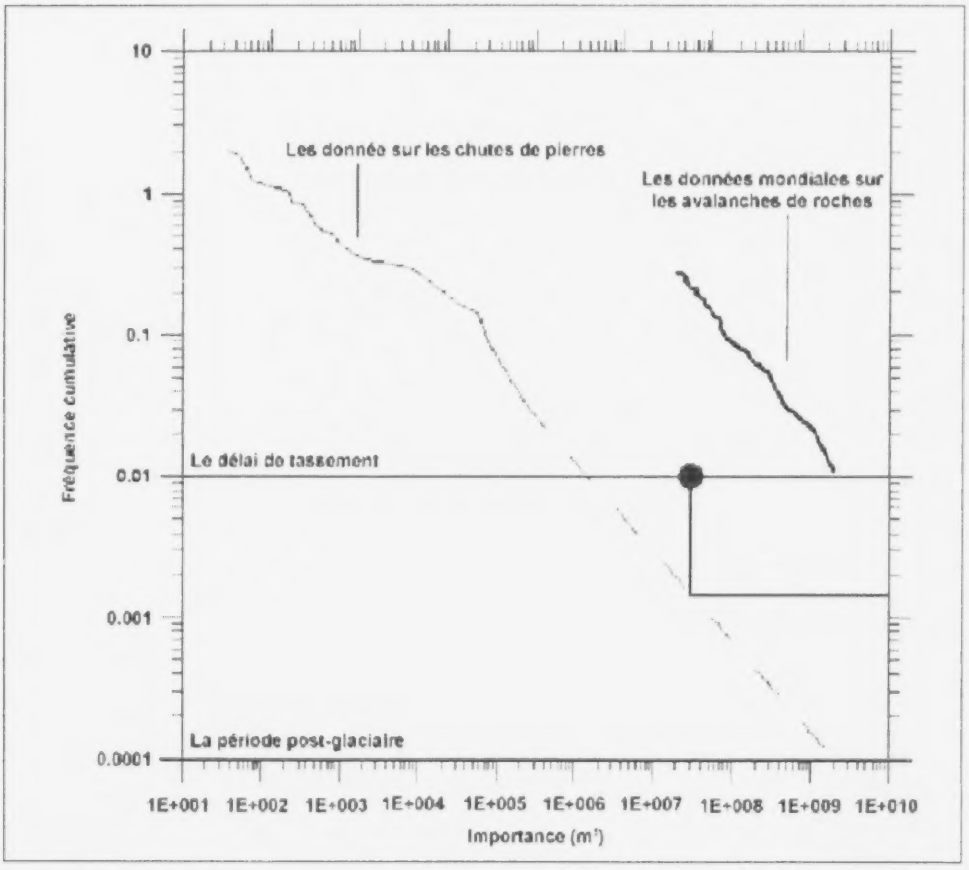
Le risque de glissement de terrain (Evans, 1997) se définit comme étant le produit de certaines conséquences mesurables d'un incident ou la probabilité qu'un incident (ou un danger) se produise (Evans, 1997).

7.1 Danger

L'élaboration d'un modèle des risques de glissements de terrain est complexe et doit tenir compte de tous les types de glissement de terrain destructeurs de la région. L'analyse de la base de données indique que les dommages sont le résultat de ruptures de pentes rocheuses, de coulées de débris, d'avalanches de débris, de la rupture de pentes bâties et de l'instabilité des pentes composées de silt glacio-lacustre. Ces quatre groupes de glissements de terrain donnent des rapports importance-fréquence divergents puisque les facteurs humains et naturels peuvent les déclencher et, par le fait même, influencer leur fréquence.

Dans le cas de la rupture d'une pente rocheuse, à laquelle on peut attribuer le plus grand nombre de décès dans la région, les données obtenues pendant l'étude permettent d'élaborer un rapport importance-fréquence de premier ordre. En faisant appel à des méthodes semblables à celles décrites par Hungr et al., (1999) et Evans (2002), les données provenant des dossiers de chutes de pierres et d'autres données sont représentées graphiquement (figure 7-1), en tenant pour acquis que la région a subi une déglaciation il y a 10 000 ans et que le temps que prend le tassement dans la région est d'environ 100 ans.

Figure 7-1 Rapport importance-fréquence de premier ordre pour la rupture de pente rocheuse dans le sud-est de la Cordillère. Les données sur les chutes de pierres proviennent des dossiers du chemin de fer et les données mondiales sur les avalanches de roches (1900–2000) proviennent de données non publiées. Le délai de tassement et la période post-glaciaire sont approximatifs. La position de l'avalanche de roches de Frank de 1903 est signalée par le point noir (consulter le texte aux fins de discussion).



Les données sur les chutes de pierres sont extrapolées à des importances plus grandes sur une parallèle linéaire importance-fréquence (M-F) avec les données mondiales (Evans, 2002) et coupe « celle en temps post-glaciaire » à une importance d'environ 109 m. Cela correspond au volume estimé de la plus importante avalanche de roches de la région, soit le glissement de terrain de la Valley of the Rocks.

Le glissement de Frank (figure 7-1) s'est produit en 1903 et ainsi se situe sur la ligne du délai de tassement, suggérant une fréquence de 1/100. Cependant, sa vraie position sur la ligne M-F suggère une fréquence plus près de 1/1000 ans (figure 7-1). Cette évaluation de la fréquence pour

une avalanche de roches de 30 M m^3 suggère une fréquence spatiale d'environ 1,12 x 10^{-4} par année par 10 000 km^2, une valeur comparable aux Alpes (Evans, 2002).

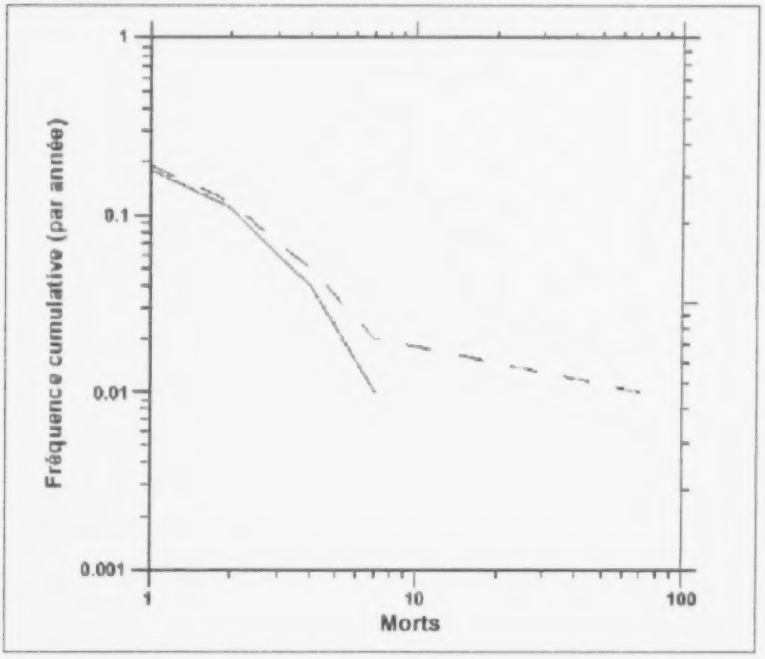
À la lumière de cette analyse de la fréquence des glissements de Frank, on peut faire valoir que l'activité humaine, sous forme d'exploitation minière à la base de la pente, a contribué à l'augmentation de la fréquence du glissement Frank selon un ordre d'importance.

En ce qui a trait aux calculs des risques, il est évident que le grand nombre de victimes à Frank peut n'être subi que dans des sites ou la densité de population est élevée. La population de la région est dispersée et, donc, ces sites sont limités aux zones peuplées. En outre, étant donné que les avalanches de roches sont presque exclusivement limitées à la zone de ceinture avancée, on ne peut s'attendre à de telles pertes que dans les zones peuplées des montagnes Rocheuses.

7.2 Risque total régional

Un risque total régional a été établi selon les données contenues dans la base de données (Figure 7-2), à l'aide de la méthode décrite par Evans (1997). On constate que l'inclusion du bilan des morts à Frank fausse sérieusement le risque total puisqu'il génère une anomalie dans la fréquence des incidents ayant fait un grand nombre de morts. Un ensemble de données excluant le bilan de Frank mène à un risque total probablement plus représentatif d'un risque total régional (figure 7-2).

Figure 7-2 Risque total régional de glissements de terrain de premier ordre dans le sud-est de la Cordillère. La ligne pointillée incorpore les victimes de Frank dans l'ensemble de données et la ligne pleine exclut ces données.



8.0 Sommaire

Le présent rapport est consacré aux glissements de terrain destructeurs dans le sud-est de la Cordillère. La zone de la région à l'étude couvre 88 732 km^2 et sa population se chiffre à 475 220, menant à une densité de population de 5,4 personnes/km^2. La densité de la population est inférieure à la plupart des pays du monde et est à peine supérieure à la moyenne pour l'ensemble du Canada (3,36 personnes/km^2).

La région a tout de même subi la catastrophe la plus meurtrière du Canada causée par un glissement en 1903, lorsque le glissement de Frank, la deuxième avalanche de roches connue à s'être produite dans la région, s'est abattu sur une partie de la ville minière de Frank. L'événement de Frank fausse beaucoup le risque total régional de glissements de terrain du sud-est de la Cordillère.

Les rapports d'importance et de fréquence indiquent qu'il y a une probabilité de 1 sur 1000 que l'avalanche de roches de Frank a été causée par l'activité humaine. Les glissements de terrain provenant de la rupture d'une pente rocheuses massive dans le sud-est de la Cordillère ont une fréquence historique comparable à celle des Alpes.

Des glissements de terrains destructeurs de plus petite importance sont plus courants. La pluie a déclenché des coulées de débris et des avalanches de débris ont frappé des localités et des infrastructures avec des effets meurtriers. Les chutes de pierres sont courantes et ont aussi frappé des localités et des infrastructures, mais avec des effets moindres. L'instabilité des pentes constituées de matériaux glacio-lacustres constitue un problème géotechnique non résolu dans la région.

Les glissements de terrain rapides dans les pentes construites par l'homme sont un élément important des risques inhérents aux glissements de terrain régionaux avec une rupture qui s'est produite dans des terrils de mine de charbon et sur les remblais de route et de chemins de fer.

Les données sur la fréquence des glissements de terrain dans le sud-est de la Cordillère sont faussées par l'activité humaine, telles les exploitations forestières, les exploitations minières, l'irrigation et la construction d'infrastructures. Cette distorsion a été probablement plus évidente pendant la phase initiale en grande partie non réglementée du développement économique de la région.

De nombreux glissements de terrain destructeurs ont été déclenchés par la pluie, ce qui rend les dangers reliés aux glissements de terrain de la région sensibles au changement climatique. L'analyse des données sur le climat recueillies pendant un siècle ont indiqué une augmentation de la température annuelle au cours des 30 dernières années. Les précipitations estivales ont aussi augmenté au cours de cette même période; l'augmentation de l'importance des incidents extrêmes ou de leur fréquence demeurent inconnus.

Les éléments des infrastructures linéaires dans la région sont plus vulnérables aux glissements de terrain destructeurs que les localités établies.

Certains glissements de terrain qui atteignent les lacs de la région ont généré d'importantes vagues de déplacement.

9.0 Références

Anderson, F.W.
1968 : The Frank Slide story; Frontier Publishing Ltd., Calgary, Alberta, 60 p.

Blakemore, W.
1903 : The Frank Disaster; The Canadian Mining Review, p. 121–122.

Brock, R.W.
1904 : The Lardeau district, B.C.; Commission géologique du Cananda, rapport récapitulatif de 1903, pp. 42–81.

Broughton, S.
1992 : Mined Rock and Overburden Piles; review and evaluation of failures; rapport provisoire de mars 1992. British Columbia Ministry of Energy, Mines, and Petroleum Resources, Victoria, Colombie-Britannique, 68 p. et annexes.

Burling, L.D.
1909 : The landslide at Frank, Alberta; Science, v. XXIV, p. 947–948.

Campbell, D.B. et Kent, A.
1995 : High mine rock piles in mountain terrain: current design trends; in Innovative mine design for the 21st century. Publié par W.F. Bawden et J.F. Archibald, Balkema, Rotterdam, p. 67–82.

Cass, D.E., Kenning, B.F.I. et Rawlings, G.
1992 : The Philpott Road debris failures – Kelowna, B.C. 1990: the impacts of geology, hydrology, and logging activities. Dans Geotechnique and natural hazards, Bitech Publishers, Vancouver, C.-B., p. 319–329.

Clague, J.J. et Evans, S.G.
1994 : Formation and failure of natural dams in the Canadian Cordillera; Commission géologique du Canada, Bulletin 464, 35 p.

Couture, R. et Evans, S.G.
2000a : Five-Mile Creek debris flow, Banff National Park, near Banff, Alberta, August 4th, 1999. Dossier public 3876 de la Commission géologique du Canada, 57 p.
2000b : The East Gate Landslide, Beaver Valley, Glacier National Park, Columbia Mountains, British Columbia. Dossier public 3877 de la Commission géologique du Canada, 26 p.
2002 : Disintegrating rock slope movements in the Beaver River valley, Glacier National Park, British Columbia, Canada. Dans Massive Rock Slope Failure: New Models for Hazard Assessment. Publié par S.G. Evans et S. Martino. Extended Abstracts Volume, OTAN Advanced Research Workshop, Celano, Italie, p. 19–23.

Cruden, D.M.
1982 : Monitoring the South Peak of Turtle Mountain; Alberta Environment, Research Management Division, RMD Report L-77, 63 p.
1986 : Monitoring the South Peak of Turtle Mountain, 1980 to 1985. Alberta Environment, Research Management Division, RMD Report 86/37, 70 p.

Cruden, D.M. et Beaty, C.B.
1987 : The Frank Slide, southwestern Alberta; Geological Society of America Centennial Field Guide Rocky Mountain Section, 1987, p. 15–18.

Cruden, D.M., Prosser, D. et Sneddon, D.T.
1982 : Monitoring the South Peak of Turtle Mountain; Proceedings, 4th Canadian Symposium on Mining Surveying and Deformation Measurements, p. 335–349.

Daly, R.A., Miller, W.G. et Rice, G.S.
1912 : Report of the commission appointed to investigate Turtle Mountain, Frank, Alberta; Commission géologique du Canada, Mémoire 27, 34 p.

Dawson, K., Panteleyev A., Sutherland Brown A., et Woodsworth G.J.
1991: Regional metallogeny, chapitre 19 dans Geology of the Canadian Cordilleran Orogene in Canada, H. Gabrielse et C.J. Yorath (éd.); Commission géologique du Canada, Geology of Canada, N° 4: p. 15–28.

Dawson, R.F., Morgenstern, N.R., et Gu, W.H.
1994: Liquefaction flowslides in Western Canadian coal mine waste dump: Phase 2, Canada Centre for Mineral and Energy Technology. Énergie, Mines et Ressources Canada, numéro de dossier d'ASC XSG41-00138(608), numéro de contrat d'ASC 23440-2-9151/01-ZSG, 112 p.

Dowlen, W.E.
1903: The Turtle Mountain rock slide; The Engineering and Mining Journal, v. 76, p. 10–12.

Evans, S.G.
1982: Landslides and surficial deposits in urban areas of British Columbia: a review; Canadian Geotechnical Journal, v. 19, p. 269–288.
1987: The breaching of moraine-dammed lakes in the southern Canadian Cordillera; Proceedings, International Symposium on Engineering Geological Environment in Mountainous Areas, v. 2, p. 141–150.
1997: Fatal landslides and landslide risk in Canada. Dans Landslide Risk Assessment, édité par D.M. Cruden et R. Fell. A.A. Balkema, Rotterdam, p. 185–196.
1999: Derailment of freight train due to trackbed failure at Mile 59.1 Nelson Subdivision, Canadian Pacific Railway, Near Creston, British Columbia May 31, 1998: Geological and Geotechnical Aspects. Rapport du Bureau de la sécurité des transports du Canada, 13 p.
2001: Landslides In Geological Hazards in Canada: a Synthesis. Édité par G.R. Brooks, Commission géologique du Canada, Bulletin 548, p. 43–79.

2002: Single-event landslides resulting from massive rock slope failure: characterizing their frequency and impact on society; dans Massive Rock Slope Failure: New Models for Hazard Assessment. Édité par S.G. Evans et S. Martino. Extended Abstracts Volume, NATO Advanced Research Workshop, Celano, Italie, p. 32-37.

Evans, S.G. et Hungr, O.
1993: The analysis of rockfall hazard at the base of talus slopes; Canadian Geotechnial Journal, v. 30, p. 620–636.

Evans, S.G. et Lister, D.R.
1984: The geomorphic effects of the July 1983 rainstorms in the southern Cordillera and their impact on transportation facilities; dans Current Research, partie B, Commission géologique du Canada, papier 84-1B, p. 223–235.

Evans, S.G. et Savigny, K.W.
1994: Landslides in the Vancouver-Fraser Valley-Whistler region. Dans *Geology and Geological Hazards of the Vancouver Region, southwestern British Columbia*. Édité par J.W.H. Monger, Commission géologique du Canada, Bulletin 481, p. 251–286.

Forest Service Investigative Team
1990: Investigation into Belgo Creek Debris Avalanche, B.C. Forest Service Report, 33 p. (avec cartes).

Fulton, R.J.
1975: Quaternary geology and geomorphology, Nicola-Vernon area, British Columbia. Commission géologique du Canada, Memoir 380.

Gabrielse H., Monger J.W.H., Wheeler J.O., et Yorath C.J.
1991: Morphological belts, tectonic assemblages, and terrains; dans le chapitre 2 de *Geology of the Canadian Cordilleran Orogene in Canada*, H. Gabrielse et C.J. Yorath (éd.); Commission géologique du Canada, Géologie du Canada, n° 4 : 707–768.

Golder Associates
1987: Regional study of coal mine waste dumps in British Columbia. Ministère des Approvisionnements et Services Canada, contrat n° 23440-6-9188/01SQ, 144 p.
1995: Runout characteristics of debris from dump failures in mountainous terrain. Stage 2: Analysis, Modelling and Prediction. Report to British Columbia Mine Waste Rock Pile Research Committee and CANMET, 55 p.

Haughton, D.R.
1978: Geological Hazards and geology of the South Columbia River valley, British Columbia. Ministry of Highways and Public Works, Geotechnical and Materials Branch Report, 64 p.

Hengeveld, H.
1997: The science of climate. Dans Responding to global climate changes in British Columbia and Yukon; Volume I of Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation. Édité par E. Taylor et B. Taylor. Chapitre 2, p. 1–6.

Hu, X-Q. et Cruden, D.M.
1992: Rock mass movements across bedding in Kananaskis Country, Alberta; Canadian Geotechnical Journal, v. 29, p. 675–685.

Hungr, O.
1995: A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. Canadian Geotechnical Journal, v. 32, p. 610–623.
1997a: Analysis of the motion of a debris avalanche event. Chikyu (Japan).
1997b: Some methods of landslide hazard intensity mapping; Dans *Landslide Risk Assessment* Édité par D.M. Cruden et R. Fell. A.A. Balkema, Rotterdam, p. 215–226.

Hungr, O. et Evans, S.G.
1988: Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards; dans Landslides, éd. C. Bonnard; Proceedings, 5th International Symposium on Landslide, v. 1, p. 685–690.
1989: Engineering aspects of rockfall hazards in Canada. Commission géologique du Canada, dossier public 2061, 102 p.

Hungr, O. et Kent, A.
1995: Coal Mine waste dump failures in British Columbia, Canada; Landslide News (Japan Landslide Society), v. 9, p. 26–28.

Hungr, O., Morgan, G.C., VanDine, D.F., et Lister, D.R.
1987: Debris flow defences in British Columbia; in Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation, éd. J.E. Costa et G.F. Wieczorek; Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, v. VII, p. 201–222.

Hungr, O., Evans, S.G., et Hazzard, J.
1999: Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia. Canadian Geotechnical Journal, v. 36, p. 224–238.

Hungr O., Ayotte D., Couture R., Evans S.G., et Guthrie R.
2000: Rockslide – debris avalanches: Recent case histories from British Columbia, Canada. European Geophysical Society, XXV General Assembly, Nice (France), 24–28 mai 2000, Volume 2, CD-ROM.

Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., et Hutchinson, J.N.
2001: A review of the classification of landslides of the flow type. Environmental and Engineering Geoscience, v. 7. p. 221–238.

Jackson, L.E., Jr.
1979: A catastrophic glacial outburst flood (jokulhlaup) mechanism for debris flow generation at the Spiral Tunnels, Kicking Horse River basin, British Columbia; Canadian Geotechnical Journal, v. 16, p. 806–813.

Jackson, L.E., Jr., Hungr., O., Gardner, J.S., et MacKay, C.
1989: Cathedral Mountain debris flows, Canada; Bulletin of the International Association of Engineering Geology, v. 40, p. 35–54.

Jakob, M., Anderson, D., Fuller, T., Hungr, O., et Ayotte, D.
2000: An unusually large debris flow at Hummingbird Creek, Mara Lake, British Columbia; Canadian Geotechnical Journal, v. 37, p. 1109–1125.

Jamieson, B.
2001: Snow avalanches. *Dans* Geological Hazards in Canada: a Synthesis. *Édité par* G.R. Brooks, Commission géologique du Canada, Bulletin 548, p. 81–100.

Jamieson, B. et Geldsetzer, T.
1996: Avalanche Accidents in Canada, Volume 4 1984–1996. Canadian Avalanche Association 193 p.

Johnson B.J.
1990: Geology adjacent to the western margin of the Shuswap metamorphic complex (Parts of 82J, M). Dossier public 1990-30, Mineral Resources Division, Geological Survey Branch, Min. Energy, Mines and Petroleum Resources, British Columbia, 1 map 1:100000: 16 p.

Kerr, J.W.
1990: Frank Slide. Barker Publishing Ltd., Priddis, Alberta. 49 p.

Krahn, J. et Morgenstern, N.R.
1976: Mechanics of the Frank slide; dans Rock Engineering for Foundations and Slopes; American Society of Civil Engineers, v. 1, p. 309–331.

Leclair, A.D.
1986: Geology of the Midge Creek Area, Nelson (82f/7, 10) map Area, southeastern British Columbia; Commission géologique du Canada, dossier public 1352.

Mackay, C.H.
1997: Management of rock slopes on the Canadian Pacific Railway; dans Landslide Risk Assessment, édité par D.M. Cruden et R. Fell. A.A. Balkema, Rotterdam, p. 271–275.

McConnell, R.G. et Brock, R.W.
1904: Report on the Great Landslide at Frank, Alberta; Annual Report of the Department of Interior for the year 1902–1903, Part VIII, 17 p.

Miller, G.E.
1983: Rockfall Investigation, Bastion Mountain, Sunnybrae, B.C. Ministry of Environment, Kamloops, 8 p.

Miller, G.E. et Nyland, P.
1981: Geological hazards and urban development of glacio-lacustrine silt beds in the Penticton area, British Columbia; Proceedings, 34th Canadian Geotechnical Conference.

Nasmith, H.
1972: Engineering geology of the southern Cordillera of British Columbia; 24th International Geological Congress, Guidebook, Field Excursion A08-C08, 34 p.

Pritchard, M.A. et Savigny, K.W.
1990: Numerical modelling of toppling; Canadian Geotechnical Journal, v. 27, p. 823–834.
1991: The Heather Hill landslide: an example of a large scale toppling failure in a natural slope. Canadian Geotechnical Journal, v. 28, p. 410–422.

Pritchard, M.A., Savigny, K.W., et Evans, S.G.
1989: Deep-seated slope movements in the Beaver River Valley, Glacier National Park, B.C. Commission géologique du Canada, dossier public 2011, 6 p.

Schaerer, P.A.
1987: Avalanche accidents in Canada. III. A selection of case histories 1978–1984. Publication NRCC 27950, Conseil national de recherches Canada.

Schleiss, V.G.
1990: Rogers Pass Snow Avalanche Control – A Summary. Environnement Canada. Revelstoke, C.-B., 22 p.

Seager, A.
1996: Frank Slide; did the greed of the coal-owners bring Turtle Mountain crashing down? The Beaver, p. 41–47.

Stethem, C.J. et Schaerer, P.A.
1979: Avalanche accidents in Canada I. A selection of case histories of accidents, 1955 to 1976; National Research Council, Division of Building Research, DBR Paper 834, 114 p.
1980: Avalanche accidents in Canada II. A selection of case histories of accidents, 1943 to 1978; National Research Council, Division of Building Research, DBR Paper 926, 75 p.

Taylor, E. et Taylor B. (eds.)
1997: Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptations. Environment Canada and British Columbia Ministry of Environment, Lands and Parks, 350 p.

Thurber Engineering
1994: Mount Stephen Snow/Debris Defences; an assessment of current conditions and future debris flow potential. Rapport à CP Rail et Parcs Canada.

Transportation Safety Board of Canada
1995: Rockfall analysis: CP Rail Freight Train 981-20 Derailment, Rail Mile 111, Nelson Subdivision, 6 1/2 miles southeast of Procter, B.C. 20 January 1995. Engineering Branch, Engineering Report LP 67/95.